中国电气工程大典编辑委员会

标准分享网 免费标准下载站 www.bzfxw.com

CHINA ELECTRICAL

中国电气工程大典

ENGINEERING CANON

第3卷

电气工程材料及器件

主编 陈 仲 黄崇祺 李 卫 李耀星
邓长胜 汪继强

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

CHINA ELECTRICAL

中国电气工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第3卷

电气工程材料及器件

主编 陈 仲 黄崇祺 李 卫 李耀星
邓长胜 汪继强

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的，是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等15卷。

本书为第3卷，电气工程材料及器件卷，主要内容包括绝缘材料、磁性材料、导体材料及其制品、电气功能材料、电线电缆及电池。

本书主要供电气工程领域技术人员和管理人员使用，也可供高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

中国电气工程大典. 第3卷，电气工程材料及器件 / 陈仲等主编；中国电气工程大典编辑委员会编. —北京：中国电力出版社，2009

ISBN 978-7-5083-7372-0

Ⅰ. 中… Ⅱ. ①陈…②中… Ⅲ. ①电气工程-中国②电工材料-中国③电气器件-中国 Ⅳ. TM

中国版本图书馆CIP数据核字（2008）第086909号

中国电力出版社出版发行

（北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn）

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年3月第1版 2009年3月北京第1次印刷

880mm×1230mm 1/16 · 64.375印张 · 2948千字 · 2插页

定价 **240.00** 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

中国电气工程大典卷目

卷　　目	篇　　目
第1卷 现代电气工程基础	1. 电磁场基础　2. 电路与电网络分析基础　3. 电磁兼容基础　4. 现代电磁测量技术基础　5. 电工材料基础　6. 高电压技术基础　7. 脉冲功率技术基础　8. 电气安全技术基础　9. 电工新技术　10. 电工标准化与合格评定、电工计量
第2卷 电力电子技术	1. 概论　2. 电力电子器件　3. 电力电子器件应用基础　4. 基本电力电子电路　5. 电力电子控制技术　6. 电力电子软开关技术　7. 电力电子多电平技术　8. 电源技术　9. 电力电子系统中的磁技术　10. 电力电子技术在电力传动中的应用　11. 电力系统中的电力电子装置　12. 电力电子电路 系统建模及计算机仿真　13. 电力电子电路 系统电磁兼容设计　14. 电力电子系统集成
第3卷 电气工程材料及器件	1. 绝缘材料　2. 磁性材料　3. 导体材料及其制品　4. 电气功能材料　5. 电线电缆　6. 电池
第4卷 火力发电工程 （上、下）	1. 概论　2. 火力发电厂设计　3. 锅炉　4. 汽轮机　5. 汽轮发电机　6. 自动控制系统　7. 电站系统与辅机设备　8. 超临界、超超临界机组　9. 大型循环流化床锅炉　10. 大型空冷式汽轮机组　11. 热电联产机组　12. 燃气轮机及联合循环机组　13. 燃煤的燃气 蒸汽联合循环机组　14. 内燃机电站　15. 电站环保技术　16. 火力发电厂运行
第5卷 水力发电工程	1. 水力发电工程通论　2. 水轮机　3. 水轮发电机　4. 电气主接线和电气设备　5. 水电站自动控制综合系统与装置　6. 水电站运行　7. 抽水蓄能电站
第6卷 核能发电工程	1. 概论　2. 压水堆核电厂　3. 核电厂的建造　4. 核电厂的调试及营运　5. 先进压水堆核电厂　6. 下一代先进核能系统
第7卷 可再生能源发电工程	1. 概论　2. 太阳能光伏发电技术　3. 太阳热发电　4. 风力发电　5. 生物质能发电　6. 海洋能发电　7. 地热发电

卷　　目	篇　　目
第8卷 电力系统工程	1. 电力系统规划　2. 远距离大容量交流输电系统　3. 高压直流输电系统　4. 灵活交流输电系统　5. 电力系统互联　6. 电力市场　7. 电力系统可靠性　8. 电力系统分析与仿真　9. 电力系统有功功率调整和频率控制　10. 电力系统无功补偿和电压控制　11. 电力系统稳定性及稳定控制　12. 电力系统控制理论与方法　13. 电力系统调度及调度自动化　14. 电力系统继电保护和安全自动装置　15. 电能质量　16. 配电系统及其自动化　17. 电力系统通信　18. 电力信息系统　19. 超导电力技术　20. 分布式能源电力系统
第9卷 电机工程	1. 电机通论　2. 同步电机　3. 感应电机　4. 直流电机　5. 特种电机
第10卷 输变电工程	1. 输电系统　2. 变电系统　3. 变压器、电抗器、互感器、电容器和调压器　4. 高压开关设备　5. 绝缘子和避雷器　6. 直流输电设备　7. 特高压输电技术　8. 输变电系统过电压与绝缘配合　9. 输变电系统的电磁环境　10. 高电压试验设备与电气绝缘试验　11. 设备状态在线监测与故障诊断技术
第11卷 配电工程	1. 概论　2. 低压电器　3. 低压成套开关设备和控制设备　4. 低压电器与成套设备可靠性技术　5. 低压电器试验与检测技术　6. 低压成套开关设备和控制设备试验与检测技术
第12卷 船舶电气工程	1. 概论　2. 船舶电机与电器　3. 船舶电站　4. 船舶电力系统　5. 船舶电力推进　6. 船舶机械电气控制　7. 综合船桥系统　8. 船舶电磁防护技术　9. 船舶电磁兼容　10. 船舶电气工艺
第13卷 交通电气工程	1. 汽车电气　2. 轨道交通电气
第14卷 建筑电气工程	1. 概论　2. 建筑电气的规范及标准　3. 建筑物电气装置标准　4. 建筑中压配电系统工程　5. 低压供配电系统　6. 建筑工程常用电器系统　7. 建筑照明　8. 建筑电气消防系统　9. 建筑设备监控系统　10. 安全防范系统与工程　11. 通信网络及信息系统　12. 防雷与接地　13. 建筑物电磁兼容技术
第15卷 电气传动自动化	1. 概论　2. 电气自动控制策略　3. 计算机控制技术　4. 电气传动控制系统　5. 装备制造电气自动化　6. 电气传动自动化的应用

编辑委员会



主任：陆燕荪



主任：陆延昌



执行主任：周鹤良



执行主任：宋天虎



电气工程材料及器件卷主编



陈 仲

桂林电器科学研究所所长、
教授级高级工程师



黄崇祺

中国工程院院士、
上海电缆研究所副总工程师、
教授级高级工程师



李 卫

钢铁研究总院功能材料研究所副所长、
永磁材料研究室主任、
教授级高级工程师



李耀星

桂林电器科学研究所绝缘材料
研究室主任、教授级高级工程师



邓长胜

上海电缆研究所科技开发中心
副主任、教授级高级工程师



汪继强

中国电子科技集团公司第十八研究所
副总工程师、教授级高级工程师

GLESI

桂林电器科学研究所



低压触头



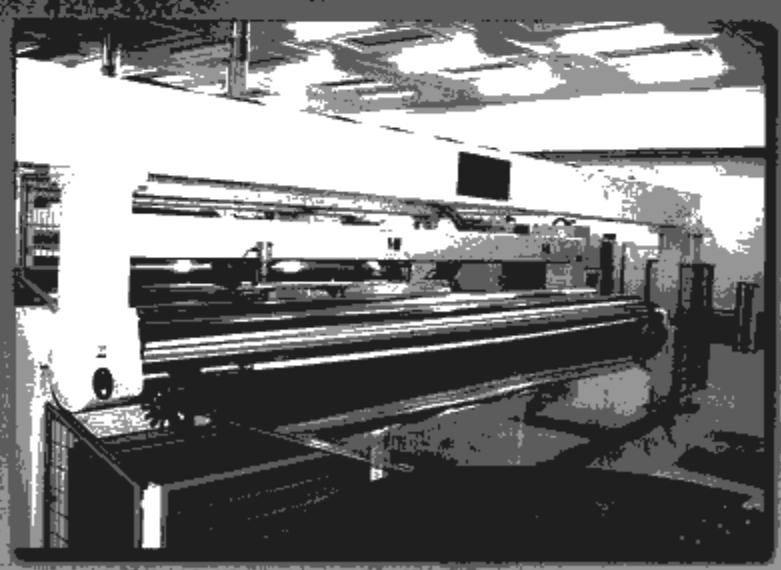
中高压触头元件



磁性材料



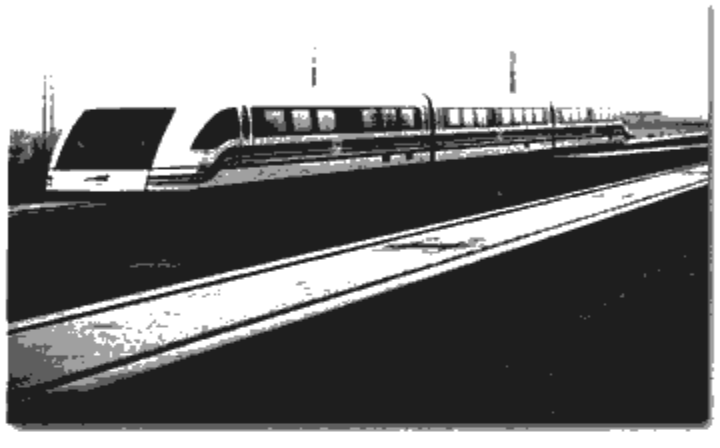
绝缘材料



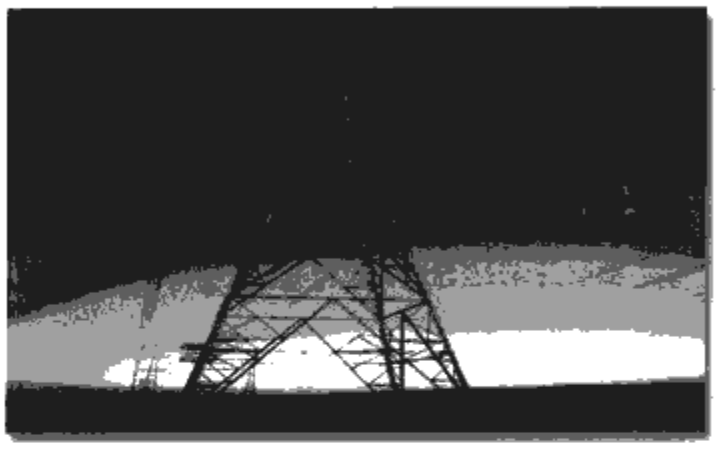
塑料薄膜双轴拉伸生产线

SECRI®

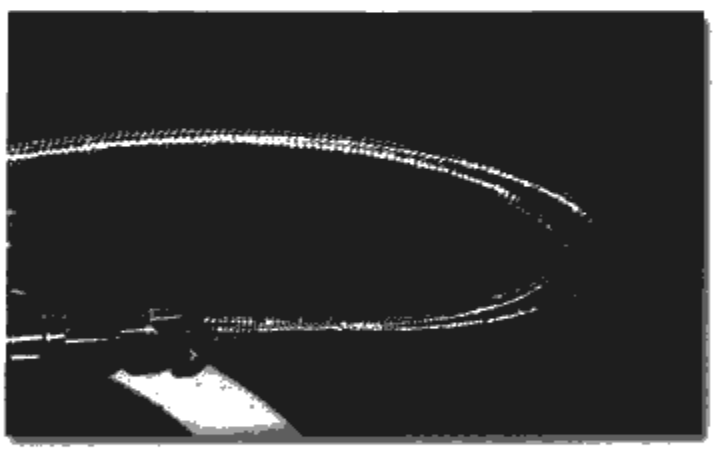
上海电缆研究所



▲ 国家"863"项目—磁悬浮交通工程用长定子电缆研究。通过自主创新，掌握了关键技术，拥有5项发明专利，使我国成为世界上第二个拥有该项技术的国家。



▲ 三峡输变电工程用500kV大容量输电线路技术研究。
▲ 750kV输变电工程用扩径导线和扩径耐热母线研究。
▲ 三峡输变电工程用大跨越系列导线与技术研究。



▲ 核反应堆堆顶电缆和连接器组件的研制。
▲ 该产品自主研发，填补了国内空白，达到国际领先水平。



▲ 特种耐高温耐辐射电磁线的研制。
▲ 该产品适用于航空航天、核电站等领域。



中国电气工程大典

编 辑 委 员 会

主　　任：陆燕荪　原机械工业部副部长、教授级高级工程师
　　中国机械工程学会名誉理事长
　　陆延昌　原电力工业部副部长、教授级高级工程师
　　中国电机工程学会理事长
执行主任：周鹤良　原机械工业部电工局局长、教授级高级工程师
　　中国电工技术学会名誉理事长
　　宋天虎　原机械工业部科技司司长、教授级高级工程师
　　中国机械工程学会常务副理事长
副 主 任：潘崇义　中国电工技术学会副理事长、教授级高级工程师
　　吴玉生　中国电机工程学会秘书长、教授级高级工程师
　　郝凤山　中国水力发电工程学会副理事长、教授级高级工程师
　　严宏强　中国动力工程学会秘书长、教授级高级工程师
　　宗　健　中国电力出版社有限公司董事长、总经理、编审

委　　员：（按姓氏笔画排列）

丁　杰　卜广全　于　龙　于坤山　于　明　于新颖　马小亮　马文忠　马伟明　马伟斌
马旭东　马济泉　马晓茜　马隆龙　丰镇平　王之杰　王为民　王正鸣　王占奎　王永骥
王成山　王兆安　王志峰　王作民　王国海　王明渝　王金元　王学伟　王泽忠　王建生
王建华　王绍武　王春华　王厚余　王炳忠　王　勇　王素英　王振铭　王　乘　王维洲
王景芹　王　强　王锡凡　王新新　王黎明　王德宽　王赞基　文习山　文劲宇　方晓燕
方　磊　尹天文　邓长胜　孔　力　孔伯汉　孔昭年　石萍萍　卢　强　卢澎湖　叶奇蓁
田东强　田培斌　史进渊　史毓珍　白少林　白俊光　白晓民　白继彬　冯江华　司马文霞
邢馥吏　戎一农　吕征宇　吕鸿达　朱庆明　朱英浩　朱宝田　朱晓明　朱家驹　朱耀泉
仲明振　任兆宏　任修明　任俊生　危师让　邬　雄　刘大明　刘广峰　刘卫宁　刘友梅
刘公直　刘文华　刘平安　刘　伟　刘仲儒　刘希清　刘　杰　刘尚明　刘国林　刘泽洪
刘建飞　刘建明　刘屏周　刘瑛岩　刘德志　齐剑波　关志成　江秀臣　江哲生　池　涌
汤　涌　汤蕴林　祁恩兰　许江宁　许忠卿　许洪华　阮江军　阮新波　阮　毅　孙才新
孙凤杰　孙成群　孙　林　孙牧海　严宏强　严陆光　严俊杰　严　萍　苏秀苹　杜正春
杜毅威　杨玉岗　杨守权　杨寿敏　杨其国　杨奇逊　杨奇娟　杨怡元　杨俊智　杨　耕
杨维迅　杨　雯　杨道刚　杨德才　李　卫　李文健　李永东　李成榕　李　旭　李兴源
李安定　李　农　李若梅　李杰仁　李宝树　李定中　李　奎　李彦明　李晓明　李颂哲
李朗如　李培植　李盛涛　李崇坚　李道本　李道林　李　鹏　李　新　李肇林　李耀星
邴凤山　肖立业　肖昌汉　肖辉乾　肖湘宁　肖耀荣　吴正国　吴创之　吴运东　吴志坚
吴国平　吴质根　吴晓波　吴培豪　邱爱慈　何木云　何阿平　何金良　何梓年　何湘宁
何瑞华　佟为明　余　志　余贻鑫　邹云屏　邹金昌　邹孟奇　应百川　辛德培　辛耀中
汪继强　汪集旸　汪樵生　汪德良　沈小宇　沈　江　沈　兵　沈邱农　沈梁伟　宋文武
宋汉武　宋哲仁　迟　速　张艺滨　张文才　张玉花　张业广　张乔根　张仲超　张兆鹤
张伯明　张冶文　张启平　张　波　张　亮　张洪钟　张祖平　张勇传　张晓江　张晓锋
张　敏　张　望　张景洲　陆永平　陆宠惠　陆俭国　陆剑秋　陆祖良　陆家榆　陆嘉明
陈汉民　陈伟根　陈　仲　陈众励　陈庆国　陈　坚　陈伯时　陈国柱　陈治明　陈建飚
陈　星　陈思锜　陈　勇　陈哲艮　陈恩鉴　陈雪梅　陈清泉　陈超志　陈敬超　陈辉明
陈黎平　陈德昌　陈德胜　陈德桂　邵　岚　苟锐锋　林云生　林公舒　林集明　易学勤
罗永浩　罗景华　金如麟　周小谦　周以国　周双喜　周　平　周仲仁　周远翔　周孝信
周建中　周思刚　周家启　周　娟　周锡生　郑小康　郑云之　郑永红　郑克文　郑明光
宗建华　宓传龙　孟庆东　赵玉文　赵光宙　赵　伟　赵红一　赵昌宗　赵治华　赵宗让
赵荣祥　赵相宾　赵　洁　赵　敏　赵婉君　赵　琨　赵　毅　赵黛青　荣命哲　胡方荪

胡　安　胡学浩　胡振岭　胡鉴清　段善旭　段献忠　侯子良　俞忠德　俞智斌　饶芳权

施　围　施鹏飞　洪元颐　姚本荣　姚尔昶　姚家祎　姚福生　贺建华　贺益康　贺湘琨

贺德馨　骆仲泱　秦　和　秦裕碧　袁余军　袁建生　袁建敏　都兴有　耿英三　莫会成

贾东旭　夏　立　夏祥贵　顾四行　顾国彪　钱昌燕　钱宝良　钱照明　倪维斗　徐元辉

徐凤刚　徐永法　徐兆丰　徐国政　徐洪海　徐殿国　徐　铢　徐德鸿　殷禄祺　奚大华

高子瑜　高文胜　高庆国　高京生　高理迎　高培庆　郭天兴　郭国顺　郭保良　郭　洁

郭振岩　郭　灏　唐任远　唐　炬　唐春潮　陶星明　黄少锋　黄仁乐　黄妙庆　黄其励

黄国治　黄学清　黄宝生　黄晓丽　黄崇祺　黄景湖　梅生伟　曹一家　曹惠彬　戚庆成

崔志强　崔　翔　康　勇　章名耀　章定邦　梁维宏　梁维燕　梁曦东　彭宗仁　葛大麟

葛少云　葛诗慧　葛蓉生　葛溪亭　葛增茂　董卫国　蒋洪德　蒋善定　韩民晓　韩英铎

惠世恩　覃大清　程天麟　程均培　程时杰　程树康　程浩忠　傅书逵　焦　侬　焦树建

舒惠芬　曾文星　曾正中　曾明富　曾南超　曾雁鸿　曾　嵘　游亚戈　谢开贵　谢秋野

雷银照　雷清泉　满慧文　蔡崇积　管瑞良　廖胜松　廖瑞金　缪鸿兴　黎晓晖　颜渝坪

薛以太　戴先中　戴庆忠　戴慧珠　魏光辉

序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放30年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至2007年底，我国发电装机容量达7.13亿kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流1000kV、直流±800kV特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入21世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近2000位专家和学者，历

时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日

前　言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放30年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和应用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统和信息管理系统的广泛应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术在电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约2000位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。

本套书的编写工作于2004年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过4年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共15卷约5000万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放30年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌

本 卷 前 言

《电气工程材料及器件》是《中国电气工程大典》中的卷目之一。

电气工程材料是电气工程的功能性基础材料，新型电气工程材料不断涌现，品种、规格、质量不断提高，为我国电气工业的迅猛发展作出了重要的贡献。

本卷共6篇，主要内容涉及绝缘材料、磁性材料、导体材料、电触头材料、热双金属材料、电瓷材料、压电材料、焊料、电线电缆、电池等。

本卷由陈仲、黄崇祺、李卫、李耀星、邓长胜、汪继强任主编，邀请桂林电器科学研究所、上海电缆研究所、钢铁研究总院、中国电子科技集团公司第十八研究所、四川东材企业集团公司、中国计量科学研究院、昆明理工大学、西安电瓷研究所、湖南大学、哈尔滨庆缘电工材料股份有限公司、株洲时代绝缘材料有限公司、上海电机（集团）公司绝缘材料厂、西安西电电工材料有限公司、杭州泰达实业有限公司、西安交通大学、北京新福润达绝缘材料有限公司、安泰科技股份有限公司、中国科学院宁波材料技术与工程研究所、北京矿业研究总院、机械工业北京电工技术经济研究所、佛山精密电工合金有限公司、亚通电子有限公司等单位的70位专家和工程技术人员参加撰写和审稿。

各篇的主编如下：

第1篇	绝缘材料	李耀星　赵　平
第2篇	磁性材料	李　卫　赵红一
第3篇	导体材料及其制品	黄崇祺
第4篇	功能材料	陈　仲
第5篇	电线电缆	邓长胜　张兆焕
第6篇	电池	汪继强

本书主要供从事电气工程材料及器件领域研究、制造、应用的工程技术人员和管理人员使用，也可供理工院校相关专业的师生参考。

由于内容繁多和编审者水平所限，书中难免存在不当之处，敬请批评指正。

编　者

桂林电器科学研究所

桂林电器科学研究所（简称桂林电科所）原为机械工业部直属研究所，1999 年 7 月，根据国务院关于中央直属科研院所转制的部署，转制为科技型企业，进入中国机械工业集团公司。

经国家科学技术部批准成立的电工材料行业生产力促进中心、机械工业电工材料产品质量监督检测中心挂靠桂林电科所。2001 年，桂林电科所由广西壮族自治区科技厅认定为高新技术企业。2006 年初，经广西壮族自治区科技厅批准，广西电工材料工程技术研究中心在桂林电科所挂牌。

桂林电科所长期以来承担着国家、部、委下达的科研任务，历年来共取得 800 多项科技成果，其中获国家、省、部级科技进步奖 100 余项。转为科技型企业后，桂林电科所依托自身强大的技术开发实力基础，创建了具有自主开发能力的电工材料、薄膜生产技术成套装备、特种电机三大高新技术产业，将科技成果实施产业化。经过多年的努力，桂林电科所产业规模不断扩大，已发展成为具有一定规模效益的科技型企业。

行业技术组织

中国电器工业协会电工合金分会

中国电器工业协会绝缘材料分会

中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会

中国模具工业协会教育培训委员会

标准化组织

全国电工合金标准化技术委员会

全国绝缘材料标准化技术委员会

全国模具标准化技术委员会

科技期刊

《绝缘材料》杂志创刊于 1966 年，中文核心期刊。

《电工材料》杂志创刊于 1973 年，中文核心期刊（遴选）来源期刊。

《模具工业》杂志创刊于 1975 年，中国模具工业协会会刊、中文核心期刊。

中国电气工程大典

第❸卷

电气工程材料及器件

编辑出版人员名单

责任编辑　刘丽平　王　磊　邓　春　陈　雷
蔡　序　俞银凤　刘　宇

复审人员　王　晶

终审人员　姜丽敏

封面设计　郑小平　王英磊

版式设计　张秋雁

责任校对　罗凤贤　常燕昆　郝军燕

责任印制　甄　茁

目　录

序
前言
本卷前言

第1篇　绝缘材料 …… 1

第1章　概述 …… 3
1　概况 …… 3
2　相关术语及定义 …… 4
2.1　绝缘材料一般术语 …… 4
2.2　绝缘材料电气性能术语 …… 5
第2章　漆、树脂 …… 7
1　有溶剂漆 …… 9
1.1　醇酸浸渍漆 …… 9
1.2　聚酯浸渍漆 …… 10
1.3　环氧亚胺浸渍漆 …… 11
1.4　聚酯亚胺浸渍漆 …… 12
1.5　聚酰亚胺浸渍漆 …… 12
1.6　聚酰亚胺耐电晕漆包线漆 …… 13
1.7　变频电机用耐电晕漆包线漆 …… 13
1.8　聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆 …… 14
1.9　硅钢片漆 …… 14
1.10　漆包线漆与丝包线漆 …… 16
2　无溶剂漆 …… 20
2.1　不饱和聚酯亚胺无溶剂滴浸树脂 …… 20
2.2　无溶剂整浸树脂——9105F级无溶剂漆 …… 20
2.3　其他无溶剂浸渍树脂 …… 21
第3章　浸渍纤维制品 …… 27
1　绝缘漆布 …… 27
1.1　绝缘漆布的品种、组成和用途 …… 27
1.2　绝缘漆布的性能 …… 27
1.3　绝缘漆布底材的性能 …… 30
2　浸渍纤维制品 …… 30
2.1　漆（胶）布 …… 30
2.2　预浸材料 …… 31
2.3　9658上胶聚芳酰胺纤维（Nomex）纸 …… 32
第4章　层压制品 …… 33
1　层压制品种类及其性能 …… 33
1.1　有机基材层压板 …… 33
1.2　无机基材层压板 …… 36
2　层压板 …… 41
2.1　酚醛层压纸板 …… 41
2.2　酚醛棉布层压板 …… 41
2.3　玻璃布层压板 …… 42
3　层压管 …… 48
3.1　层压纸管 …… 48
3.2　3526酚醛层压棉布管 …… 48
3.3　玻璃布层压管 …… 49
4　层压棒 …… 52
4.1　3721酚醛层压布棒 …… 52
4.2　层压玻璃布棒 …… 52
第5章　电工塑料 …… 54
1　酚醛塑料 …… 54
1.1　酚醛模压塑料 …… 54
1.2　玻璃纤维增强酚醛注塑料 …… 55
2　氨基模塑料 …… 55
2.1　物理性能 …… 55
2.2　电气性能 …… 55
2.3　力学性能 …… 55
2.4　热性能 …… 56
2.5　工艺性能 …… 56
2.6　产品特点 …… 56
2.7　适用范围和应用技术 …… 56
3　不饱和聚酯模塑料 …… 56
3.1　不饱和聚酯团状模塑料 …… 56
3.2　不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料 …… 57
3.3　9801不饱和聚酯玻璃纤维模塑板 …… 58
3.4　干式不饱和聚酯模塑料 …… 58
4　GPO—3模塑料 …… 60
4.1　物理性能 …… 60
4.2　介电性能 …… 60
4.3　热性能 …… 60
4.4　产品特点 …… 60
4.5　适用范围和应用技术 …… 60
第6章　云母制品 …… 61
1　云母带 …… 61
1.1　环氧玻璃粉云母带 …… 61
1.2　F级环氧桐马酸酐玻璃多胶粉云母带系列产品 …… 62
1.3　桐马环氧玻璃粉云母带 …… 64
1.4　环氧硼胺玻璃粉云母带 …… 65
1.5　快固化云母带 …… 65
1.6　中胶粉云母带 …… 66
1.7　少胶云母带 …… 67
1.8　厚型云母带 …… 67
1.9　二苯醚云母带 …… 68
1.10　耐火云母带 …… 68
1.11　9547—1单面玻璃少胶粉云母带 …… 69
1.12　桐马环氧玻璃粉云母带 …… 69
1.13　5438—1环氧玻璃粉云母带 …… 70
1.14　9543—1F级整浸粉云母带 …… 71
1.15　F级环氧玻璃聚酯薄膜粉云母带 …… 71
2　柔软云母板 …… 71
2.1　组成 …… 73
2.2　物理、力学性能及介电性能 …… 73
2.3　产品特点 …… 74
2.4　适用范围和应用技术 …… 74
3　塑型云母板 …… 74
3.1　组成 …… 74
3.2　物理、力学及介电性能 …… 74
3.3　产品特点 …… 74
3.4　适用范围和应用技术 …… 74
4　换向器云母板 …… 74

4.1 组成 …… 75
4.2 物理、力学及介电性能 …… 75
4.3 产品特点 …… 75
4.4 适用范围和应用技术 …… 75
第7章 薄膜、胶粘带及复合材料 …… 76
1 电工聚丙烯薄膜 …… 76
1.1 组成 …… 76
1.2 物理性能 …… 76
1.3 电气性能 …… 77
1.4 力学性能 …… 77
1.5 产品特点 …… 78
1.6 适用范围和应用技术 …… 78
2 聚酯薄膜 …… 78
2.1 透明或半透明聚酯薄膜 …… 79
2.2 阻燃聚酯薄膜 …… 79
2.3 录音、录像带用聚酯薄膜 …… 80
2.4 行输出变压器用聚酯薄膜 …… 81
2.5 薄膜开关聚酯薄膜 …… 81
2.6 亚光聚酯薄膜 …… 81
2.7 白板聚酯薄膜 …… 82
2.8 电容器用聚酯薄膜 …… 82
2.9 表面硬化聚酯薄膜 …… 83
2.10 黑色聚酯薄膜 …… 83
3 聚酰亚胺薄膜 …… 84
3.1 物理性能 …… 84
3.2 介电性能 …… 84
3.3 耐化学性能 …… 84
3.4 热性能 …… 84
3.5 产品特点 …… 85
3.6 适用范围和应用技术 …… 85
4 压敏胶粘带 …… 85
4.1 组成 …… 85
4.2 性能 …… 86
4.3 特点 …… 86
4.4 应用范围 …… 86
5 复合材料 …… 86
5.1 6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料 …… 87
5.2 6630、6630A 聚酯薄膜聚酯纤维纸复合材料 …… 87
5.3 6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维纸复合材料 …… 89
5.4 6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料 …… 89
5.5 6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸复合材料 …… 90
5.6 环氧预浸渍材料 …… 90
第8章 其他绝缘材料 …… 92
1 聚酯纤维非织布 …… 92
1.1 物理性能 …… 92
1.2 力学性能 …… 92
1.3 热性能 …… 92
1.4 产品特点 …… 92
1.5 使用范围和应用技术 …… 92
2 无机绝缘材料 …… 92
2.1 绝缘子材料 …… 93
2.2 高压电器瓷套 …… 98
2.3 套管 …… 99
2.4 低压线路绝缘子 …… 101
2.5 玻璃绝缘子及材料 …… 102
2.6 有机复合绝缘子及其材料 …… 102
2.7 电器设备及电子装置用陶瓷 …… 103
参考文献 …… 111

第2篇 磁性材料 …… 113

第1章 概述 …… 115
1 磁性材料的分类和特点 …… 115
2 磁性材料的磁学基础 …… 115
2.1 磁学基本量及其单位制 …… 115
2.2 磁滞回线 …… 117
2.3 磁畴和相互作用能 …… 118
2.4 技术磁化 …… 118
2.5 磁性材料技术磁性参量 …… 119
3 磁性材料的矫顽力机理简介 …… 120
3.1 畴壁位移过程中的应力和掺杂理论 …… 120
3.2 磁矩不可逆转动—高各向异性理论 …… 120
3.3 形（成）核理论 …… 120
3.4 钉扎理论 …… 121
3.5 形核与钉扎机制比较 …… 121
第2章 永磁材料 …… 123
1 永磁材料的种类、发展历史及其应用领域 …… 123
1.1 永磁材料的种类 …… 123
1.2 永磁材料的发展历史及其应用 …… 123
2 铸造金属永磁材料 …… 124
2.1 铸造金属永磁分类、结构及磁特性 …… 124
2.2 应用基本知识 …… 126
3 铁氧体永磁材料 …… 126
3.1 铁氧体永磁材料的结构及磁性 …… 126
3.2 钡铁氧体材料 …… 127
3.3 锶铁氧体材料 …… 129
3.4 铁氧体永磁材料的性能特点及应用 …… 131
4 烧结稀土永磁材料 …… 131
4.1 $SmCo_5$ 稀土永磁材料 …… 131
4.2 Sm_2Co_{17} 型稀土永磁材料 …… 135
4.3 Nd—Fe—B 稀土永磁材料 …… 139
5 其他永磁材料 …… 145
5.1 Fe—Cr—Co 系永磁材料 …… 145
5.2 (Fe，Co)—Pt 系永磁材料 …… 147
5.3 永磁薄膜 …… 149
第3章 软磁材料 …… 150
1 电磁纯铁 …… 150
1.1 牌号及其用途 …… 150
1.2 电磁纯铁化学成分 …… 150
1.3 电磁纯铁的制取 …… 150
1.4 电磁纯铁性能 …… 150
1.5 成品尺寸要求 …… 150
1.6 国内主要生产厂家 …… 151
2 无取向电工钢 …… 152
2.1 冷轧无取向电工钢 …… 152
2.2 冷轧无取向硅钢薄带 …… 160
2.3 热轧硅钢 …… 160
3 冷轧取向硅钢 …… 163
3.1 CGO 钢（普通取向硅钢） …… 164
3.2 Hi-B 钢（高磁感取向硅钢） …… 166

3.3　全工艺冷轧取向电工钢产品性能 …… 166
3.4　冷轧取向硅钢薄带 …… 168
4　软磁合金 …… 170
4.1　铁镍系软磁合金 …… 170
4.2　铁钴系合金 …… 184
4.3　铁铝系合金 …… 186
4.4　耐蚀软磁合金 …… 188
4.5　软磁合金的供货方式及铁心系列 …… 191
4.6　软磁合金特性总览和材料选择 …… 194
5　软磁铁氧体 …… 204
5.1　锰锌铁氧体 …… 204
5.2　镍锌铁氧体 …… 205
5.3　主要软磁铁氧体生产公司的锰镍铁氧体、镍锌铁氧体产品性能介绍 …… 206
6　非晶及纳米晶软磁材料 …… 211
6.1　铁基非晶合金 …… 211
6.2　铁基纳米晶合金 …… 212
第4章　新型磁功能材料 …… 216
1　磁制冷与磁蓄冷材料 …… 216
1.1　磁卡效应热力学基础 …… 216
1.2　磁制冷的原理和磁制冷技术的特点 …… 216
1.3　磁制冷材料 …… 216
1.4　磁蓄冷材料和磁蓄冷器 …… 217
1.5　磁制冷系统与装置 …… 218
2　稀土巨磁致伸缩材料 …… 219
2.1　磁致伸缩现象 …… 219
2.2　磁致伸缩的理论基础及原理 …… 219
2.3　磁致伸缩材料的发展 …… 219
2.4　磁致伸缩材料的特性 …… 219
2.5　$Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ 材料的制备与生产 …… 220
2.6　Tb-Dy-Fe 材料的应用领域 …… 220
3　磁光存储材料 …… 222
3.1　磁光存储技术的发展进程 …… 222
3.2　磁光存储的物理基础和对材料性能的要求 …… 222
3.3　磁光存储材料 …… 223
3.4　未来磁光记录技术的发展 …… 224
4　巨磁电阻材料 …… 225
4.1　巨磁电阻材料类型及其特点 …… 225
4.2　巨磁电阻材料的制备技术 …… 226
4.3　巨磁电阻材料及其器件的应用 …… 227
5　庞磁电阻材料 …… 228
5.1　钙钛矿锰氧化物的庞磁电阻效应 …… 228
5.2　CMR 效应的特点 …… 228
5.3　晶体结构 …… 228
5.4　相互作用和磁结构 …… 229
5.5　锰氧化物系统的理论模型 …… 229
5.6　低温铁磁态性质 …… 229
5.7　高温铁磁态性质 …… 229
5.8　锰氧化物系统的相分离 …… 229
5.9　新型 CMR 材料 …… 230
5.10　锰氧化物 CMR 材料的应用 …… 230
6　稀释磁性半导体材料 …… 230
6.1　稀释磁性半导体材料 …… 230
6.2　几种典型的稀磁半导体材料 …… 230
6.3　基于稀磁半导体材料的自旋功能器件 …… 231
第5章　其他磁性材料 …… 233
1　微波铁氧体材料与器件 …… 233
1.1　微波铁氧体的非互易效应 …… 233
1.2　微波铁氧体材料 …… 235
1.3　微波铁氧体非互易器件 …… 241
2　磁记录材料 …… 245
2.1　磁记录材料的性能特征 …… 245
2.2　制备工艺 …… 246
第6章　磁性材料测量 …… 248
1　磁特性参数 …… 248
1.1　剩磁 …… 248
1.2　矫顽力 H_{cB} …… 248
1.3　内禀矫顽力 H_{cJ} …… 248
1.4　最大磁能积 …… 248
1.5　回复磁导率 …… 248
1.6　方形度 …… 249
1.7　饱和磁化强度 …… 249
1.8　磁特性参量的温度系数 …… 249
2　闭磁路测量 …… 249
2.1　闭磁路测量基本设备 …… 249
2.2　闭磁路测量方法 …… 251
2.3　稀土永磁材料的测量特点 …… 253
2.4　高温测量及温度系数的确定 …… 255
2.5　闭磁路测试系统的校准 …… 256
3　开磁路测量 …… 257
3.1　振动样品磁强计（VSM） …… 257
3.2　亥姆霍兹（Helmholtz）线圈测量 …… 261
3.3　交变梯度磁强计（AGFM） …… 262
3.4　脉冲磁场测量仪（PFM） …… 263
参考文献 …… 267

第3篇　导体材料及其制品 …… 269

第1章　概述 …… 271
1　金属导体 …… 271
1.1　导体种类 …… 271
1.2　导体名称 …… 271
2　有关金属共用的数据、单位换算和导体的强化 …… 271
2.1　金属的物理性能 …… 271
2.2　导体公制直径、面积表示法和英、美线规的换算 …… 273
2.3　导体电阻、电阻率、电导率及有关换算 …… 275
2.4　导体的强化 …… 277
3　高纯铝及其应用 …… 278
3.1　铜、铝导体的低温电阻率和在超导体稳定化材料中的应用 …… 278
3.2　高纯铝标准 …… 278
4　导体的金属加强材料 …… 279
4.1　架空绞线用镀锌钢线 …… 279
4.2　架空地线用镀锌钢绞线 …… 281
4.3　锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线 …… 282
4.4　美国标准钢芯铝绞线用锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线 …… 286
4.5　美国标准钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线用高强度锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线 …… 287
4.6　美国标准架空地线用锌—5%铝—混合稀土

合金镀层钢绞线 …… 288
5 导体的腐蚀与保护 …… 289
5.1 在橡皮绝缘线缆中铜线的发黑发黏和防护 …… 289
5.2 铜线在空气中发黑和保护 …… 289
5.3 钢芯铝绞线在空气中局部发黑及其试验 …… 289
5.4 钢芯铝或钢、铝混绞线在大气中的腐蚀和保护 …… 291
5.5 架空导线用防腐油特性 …… 293
6 架空导线的型式试验 …… 296
6.1 架空导线（相导线）的型式试验 …… 296
6.2 光纤复合（组合）架空地线的型式试验 …… 299
第2章 铜导体 …… 301
1 铜导体的原材料——阴极铜 …… 301
1.1 高纯阴极铜（Cu—CATH—1） …… 301
1.2 标准阴极铜（Cu—CATH—2） …… 301
1.3 加工铜化学成分和产品形状 …… 303
1.4 关于电工用铜线锭标准 …… 304
2 杂质元素对铜性能的影响 …… 304
2.1 杂质元素对铜导体电导率（电阻率）的影响 …… 304
2.2 杂质元素对铜综合性能的影响 …… 304
3 铜的性能 …… 309
3.1 物理性能 …… 309
3.2 力学性能 …… 309
3.3 化学性能 …… 309
3.4 磁性能 …… 309
4 电工用铜杆生产 …… 311
4.1 低氧（韧）铜杆和无氧铜杆的区别 …… 312
4.2 低氧（韧）铜杆生产 …… 313
4.3 无氧铜杆生产 …… 316
5 废杂铜的直接再生应用 …… 322
5.1 废杂铜直接再生铜导体的应用 …… 322
5.2 废杂铜在低氧光亮（韧铜）铜杆生产中的应用 …… 323
5.3 废杂铜在无氧铜杆生产中的应用 …… 326
6 电工铜线生产 …… 327
6.1 电工铜线生产的可轧性、可拉性和可退火性 …… 327
6.2 铜杆的分等 …… 328
6.3 电磁线生产的特殊要求和专用试验方法 …… 328
6.4 杂质对再结晶行为和断头率的影响 …… 331
6.5 铜杆的质量监控 …… 335
6.6 铜拉线润滑剂及其系统的正确使用 …… 335
6.7 制线装备的发展 …… 338
7 铜导体的制品及其应用 …… 338
7.1 铜排在母线槽上的应用 …… 339
7.2 铜（铜合金、铜—钢、铜—铝、钢—铝）导体在接触导线（电车线）上的应用 …… 339
7.3 铜导体在电机、变压器、开关上的应用 …… 340
8 铜和铜合金的专用试验方法 …… 341
8.1 硝酸亚汞试验 …… 341
8.2 氢脆试验 …… 342
8.3 氧化膜黏附性试验 …… 344
8.4 平均晶粒度测定 …… 345
8.5 高电导率铜的螺旋伸长试验 …… 346
第3章 铜合金导体 …… 348
1 铜合金导体的要求、合金元素的选择和导体的加工工艺 …… 348
1.1 铜合金导体的要求 …… 348
1.2 合金元素的选择 …… 348
1.3 铜合金导体的加工工艺 …… 349
2 铜合金导体的标准和公司牌号 …… 349
2.1 美国铜合金导体国家标准 …… 349
2.2 英国、欧洲铜合金导体国家标准 …… 350
2.3 中国铜合金导体国家标准 …… 350
2.4 铜合金导体公司牌号 …… 350
3 铜合金导体及其应用 …… 352
3.1 银铜（Cu—Ag）及其应用 …… 352
3.2 锡铜（Cu—Sn）及其应用 …… 354
3.3 镁铜（Cu—Mg）及其应用 …… 355
3.4 铜合金接触线及其在电气化铁道和城市轨道交通中的应用 …… 357
3.5 稀土及其在铜合金中的应用 …… 362
3.6 其他导电用铜合金及其应用 …… 363
4 铜合金导体及其在特种电线电缆中的应用 …… 365
4.1 含有微量锡的铜线在超微细铜线中的应用 …… 365
4.2 铜—锡—铟合金线在要求高弯曲疲劳寿命电线电缆中的应用 …… 365
4.3 半软化（退火）铜—锡—铟合金线在负荷—应变范围广、且弯曲应变很高的柔软电缆中的应用 …… 365
4.4 直径0.016mm铜—锡—铟（NN）线在超微型同轴电缆中的应用 …… 366
4.5 铜—锡—铟和铜—锌合金在放电高速切割和精密加工用镀层电极线上的应用 …… 367
5 镉铜导体及其代用 …… 368
第4章 铝导体 …… 370
1 铝导体的原材料 …… 370
1.1 电工铝导体用铝锭及其正确的选用 …… 370
1.2 铝锭的牌号（铝的总含量%）、应控杂质元素的个数和数量 …… 371
1.3 我国电缆工业对电工用铝锭化学成分的要求 …… 371
1.4 电缆工业关于GB/T 3954—2001《电工圆铝杆》的说明 …… 372
2 杂质元素对铝导体性能的影响 …… 373
2.1 铝的性能 …… 373
2.2 杂质元素的影响 …… 374
3 电工铝杆生产 …… 375
3.1 电工铝杆生产的工艺流程和主要装备 …… 375
3.2 铝液精炼、过滤及其效果 …… 377
3.3 电工铝导体的稀土优化综合处理技术 …… 379
3.4 稀土对提高铝电导率的作用机理 …… 383
4 电工铝线生产 …… 384
4.1 电工硬铝线制造 …… 384
4.2 电工铝线与电工稀土铝线的性能比较 …… 385
4.3 影响铝线退火行为的因素 …… 385
4.4 铝拉线装备的新进展 …… 386
4.5 拉铝线的润滑剂及其过滤 …… 387
5 细铝线生产 …… 389
5.1 铝漆包线的生产流程及对细铝线生产的技术要求 …… 389

5.2 细铝线生产的特点 …… 390
5.3 拉细铝线的滚筒选择 …… 392
5.4 拉细铝线的润滑及过滤系统 …… 392
5.5 细铝线拉线机 …… 393
6 电工铝线的应用 …… 393
6.1 长江三峡送电工程±500kV主干线路用大截面钢芯铝绞线（ACSR—720/50） …… 393
6.2 架空线路用扩径导线 …… 394
6.3 变电站用扩径导线 …… 396
6.4 型线同心绞架空导线 …… 397
6.5 自阻尼导线和含有一层或多层自支持层的同心绞架空导线 …… 397
6.6 光纤组合（复合）架空相导线（OPPC） …… 398
6.7 复合碳纤维加强的铝（或耐热铝合金）组合导线 …… 398
第5章 铝合金导体 …… 401
1 不同用途对铝合金导线的要求 …… 401
2 导电用铝合金线的合金系、合金主要组成和牌号 …… 401
3 高强度铝合金线 …… 401
3.1 高强度铝合金线制造 …… 404
3.2 高强度铝合金线标准 …… 405
4 中强度铝合金线 …… 405
4.1 非热处理加工硬化型KAL中强度铝合金 …… 406
4.2 半热处理半加工硬化型中强度铝合金 …… 407
4.3 中强度铝合金线标准 …… 407
5 绝缘电线电缆导电线芯、电磁线及细线用铝合金线 …… 407
5.1 铝合金线的抗拉强度和伸长率 …… 409
5.2 耐热性 …… 410
5.3 振动疲劳特性 …… 410
5.4 蠕变特性和松弛特性 …… 410
5.5 接续性能 …… 410
5.6 耐蚀性能 …… 411
6 耐热铝合金线 …… 412
6.1 耐热铝合金线的特性 …… 412
6.2 耐热铝合金线的制造 …… 414
6.3 耐热铝合金线的标准和性能 …… 415
7 电缆屏蔽编织用铝合金线 …… 418
7.1 铝镁合金线 …… 418
7.2 铝镁硅合金线 …… 420
7.3 电缆编织屏蔽用铝合金圆线标准（JB/T 8998—1999） …… 420
8 耐蚀铝合金线 …… 420
9 铝合金导线的应用 …… 422
9.1 高强度铝合金导线的应用 …… 422
9.2 中强度铝合金绞线标准 …… 423
9.3 耐热铝合金导线的应用 …… 423
9.4 铝—镁—锌—稀土合金在贯通地线护套上的应用 …… 429
第6章 双金属复合导体和镀层导体 …… 430
1 双金属复合导体 …… 430
1.1 铝包钢线 …… 430
1.2 铜包铝线及铜包铝排（母线） …… 442
1.3 铜包钢线 …… 447
1.4 其他双金属包复制品 …… 457
2 镀层导体 …… 461
2.1 高温绝缘金属导电线芯用镀层线 …… 461
2.2 镀锡铜线和镀锡铜包钢线 …… 463
2.3 镀银铜线和镀银铜包钢线 …… 467
2.4 镀镍铜线和镀镍铜包钢线 …… 469
第7章 超导体 …… 473
1 电力和磁体技术对超导体的要求 …… 473
2 低温超导体（LTS） …… 473
2.1 铌钛合金超导体 …… 473
2.2 铌三锡超导体 …… 475
2.3 二硼化镁（MgB_2）超导体 …… 476
3 高温超导体（HTS） …… 477
3.1 BSCCO—2223超导体 …… 477
3.2 BSCCO—2212超导体 …… 479
3.3 DI—BSCCO—2223（CT—OP—BSCCO—2223）超导体 …… 479
3.4 钇钡铜氧（YBCO）镀膜超导体 …… 480
第8章 特种导体 …… 485
1 单晶铜及其在音响线缆上的应用 …… 485
1.1 音响线缆用导体及其发展 …… 485
1.2 单晶铜及其性能 …… 487
2 键合线（Bonding Wire）及其在半导体封装上的应用 …… 488
2.1 金键合线 …… 489
2.2 铜键合线 …… 490
2.3 铝—1%硅合金键合线 …… 490
2.4 大功率器件封装用铝键合线 …… 491
3 新一代玻璃膜微细磁性线和导电线及它们的应用 …… 491
3.1 玻璃膜微细线制造工艺 …… 492
3.2 玻璃膜微细线的特点 …… 492
3.3 玻璃膜微细和超微细线的应用 …… 492
3.4 新一代玻璃膜微细线的开发和应用正在继续 …… 493
参考文献 …… 495

第4篇 电气功能材料 …… 505

第1章 电触头材料 …… 507
1 电触头与电接触 …… 507
1.1 电触头分类 …… 507
1.2 电接触的基本概念 …… 507
1.3 材料技术及主要元素的物理性能 …… 508
2 轻负载电触头材料 …… 509
2.1 银及银合金 …… 509
2.2 金基合金 …… 510
2.3 铂族合金 …… 511
2.4 轻负载电触头材料的选用原则 …… 514
3 低压电器用电触头材料 …… 514
3.1 低压电器用银基电触头材料 …… 514
3.2 低压电器用电触头材料的电气性能特点和用途 …… 523
3.3 低压电器用电触头材料的选用原则 …… 524
3.4 低压电器用电触头的规格、形状及尺寸 …… 524
4 中高压电器用电触头材料 …… 529
4.1 高压断路器用触头材料 …… 530

4.2 铜钨电触头材料的牌号、成分及其主要性能 …… 531
4.3 铜钨电触头材料的制造 …… 532
4.4 粉末性能对铜钨电触头材料的影响 …… 533
4.5 整体触头（自力型） …… 533
4.6 CuW 触头材料的应用 …… 535
4.7 国外中高压电触头材料的发展动态 …… 536
5 真空开关用触头材料 …… 537
5.1 真空开关触头材料的工作环境与要求 …… 537
5.2 真空开关触头材料的种类及其性能 …… 538
5.3 改进 CuCr 触头材料性能，满足真空开关发展的要求 …… 545
第 2 章 热双金属 …… 546
1 热双金属的组元合金 …… 546
1.1 热双金属的主动层合金 …… 546
1.2 热双金属的被动层合金 …… 546
1.3 热双金属的中间层合金 …… 547
2 热双金属的性能指标 …… 547
2.1 热敏感性指标 …… 547
2.2 电阻率 …… 548
2.3 线性温度范围 …… 548
2.4 可用温度范围 …… 549
2.5 最高使用温度 …… 549
2.6 弹性模量 …… 549
2.7 最大负荷应力 …… 549
3 国内外热双金属的相近牌号 …… 549
3.1 GB/T4461—1992《热双金属带材》标准 …… 549
3.2 美国 ASTM B388—2000《热双金属带材》标准 …… 551
3.3 德国 DIN 1715《热双金属带材》标准 …… 551
3.4 佛山精密电工合金有限公司（FEPAC）热双金属带材部分牌号的性能参数 …… 551
3.5 法国 IMPHY 公司部分热双金属带材的性能 …… 551
3.6 日本 SUMITOMO 公司部分热双金属带材的性能 …… 555
3.7 美国 PMC 公司部分热双金属带材的性能 …… 555
3.8 美国 TI 公司部分热双金属带材的性能 …… 555
3.9 国内外部分热双金属牌号对照 …… 555
4 热双金属的应用 …… 561
4.1 热双金属材料的选择原则 …… 561
4.2 工作温度和温曲率 …… 561
4.3 电阻率 …… 562
4.4 热双金属元件的成型与安装 …… 562
4.5 热双金属元件的稳定化处理 …… 563
4.6 热双金属元件的防护 …… 563
4.7 热双金属元件的计算 …… 563
4.8 闪动式碟形元件 …… 564
第 3 章 电瓷材料 …… 566
1 电瓷原料 …… 566
1.1 电瓷材料的分类 …… 566
1.2 黏土原料 …… 566
1.3 瘠性原料 …… 571
1.4 熔剂原料 …… 575
1.5 其他原料 …… 577
2 坯釉砂配方 …… 577
2.1 坯料 …… 577
2.2 釉料 …… 578
2.3 瓷砂料 …… 580
3 瓷材料 …… 581
3.1 瓷材料分类及其性能 …… 581
3.2 瓷、釉的显微结构 …… 582
3.3 提高瓷材料性能的途径 …… 584
4 电瓷的材料、坯釉性能及测试方法 …… 586
4.1 电瓷材料化学分析 …… 586
4.2 原料性能试验 …… 589
4.3 坯料性能试验 …… 607
4.4 釉料性能试验 …… 617
4.5 瓷材料性能试验 …… 621
第 4 章 压电材料 …… 630
1 压电效应与压电晶体 …… 630
1.1 压电效应 …… 630
1.2 压电晶体 …… 630
1.3 铁电体 …… 631
2 单晶体压电材料 …… 633
2.1 仅有压电性的单晶体材料 …… 633
2.2 压电热释电单晶体材料（铁电晶体、反铁电晶体、非铁压电热释电单晶体） …… 634
2.3 压电半导体单晶体材料 …… 636
3 多晶体压电材料 …… 636
3.1 铁电陶瓷 …… 636
3.2 反铁电陶瓷 …… 637
3.3 铁电半导体陶瓷 …… 638
4 薄膜压电材料 …… 638
4.1 压电薄膜与压电半导体薄膜 …… 638
4.2 铁电薄膜 …… 639
5 压电复合材料 …… 640
5.1 压电复合材料的结构及复合效应 …… 640
5.2 晶态聚合物/铁电陶瓷材料 …… 641
5.3 非晶态聚合物/铁电陶瓷材料 …… 642
6 压电聚合物材料 …… 642
6.1 晶态压电聚合物材料 …… 642
6.2 非晶态压电聚合物材料 …… 643
第 5 章 焊料 …… 644
1 焊料的型号和牌号的表示方法 …… 644
1.1 焊料的型号 …… 644
1.2 焊料的牌号 …… 644
2 焊料的选用原则 …… 644
3 电气工程常用焊料 …… 644
3.1 锡铅焊料 …… 644
3.2 锡基无铅软焊料 …… 647
3.3 金基软焊料 …… 655
3.4 铟基焊料 …… 655
3.5 铋基焊料 …… 655
3.6 铝用锌基焊料 …… 656
3.7 其他软焊料 …… 656
3.8 铜基焊料 …… 657
3.9 银基焊料 …… 657
参考文献 …… 663
第 5 篇 电线电缆 …… 665
第 1 章 电力电缆及其附件 …… 667

1　中低压电力电缆的基本结构 …… 667
1.1　导体 …… 667
1.2　绝缘 …… 669
1.3　屏蔽 …… 670
1.4　缆芯的内衬层与填充物 …… 671
1.5　护套 …… 671
1.6　铠装 …… 672
1.7　外护层的适用场合 …… 673
1.8　常用原材料的技术要求 …… 673
2　电力电缆的品种和技术指标 …… 678
2.1　额定电压 35kV 及以下挤包绝缘电力电缆 …… 678
2.2　额定电压 110kV 及以上交联聚乙烯绝缘电力电缆 …… 683
2.3　额定电压 35kV 及以下不滴流油（包括黏性油）浸纸绝缘金属套电力电缆 …… 685
2.4　额定电压 110kV 及以上自容式充油电缆 …… 687
2.5　海底电力电缆 …… 689
2.6　直流电力电缆 …… 690
2.7　高温超导电缆 …… 691
3　电力电缆附件 …… 692
3.1　电力电缆附件常用的绝缘材料和半导电材料及其部件 …… 692
3.2　额定电压 35kV 及以下黏性油（含不滴流油）浸纸绝缘电缆的附件 …… 694
3.3　额定电压 35kV 及以下挤包绝缘电缆附件 …… 695
3.4　额定电压 110kV 及以上自容式充油电缆附件 …… 697
3.5　额定电压 66kV 及以上交联聚乙烯电缆附件 …… 698
4　电力电缆和低压配电用电线电缆连续负荷载流量 …… 699
4.1　聚氯乙烯绝缘电缆载流量 …… 699
4.2　交联聚乙烯绝缘电缆载流量 …… 701
4.3　自容式充油电缆载流量 …… 703
4.4　室内配电用电线和移动电缆载流量 …… 704
4.5　电缆载流量的修正系数 …… 705
5　电力电缆常用试验方法 …… 705
5.1　局部放电试验 …… 705
5.2　冲击电压试验 …… 706
5.3　介质损耗角正切试验 …… 707
5.4　交流电压试验 …… 708
5.5　直流电压试验 …… 709
5.6　绝缘电阻试验 …… 710
5.7　表面电阻试验 …… 711
第 2 章　架空绝缘电缆 …… 713
1　架空绝缘电缆的基本结构及其材料 …… 713
1.1　导体 …… 713
1.2　绝缘 …… 714
1.3　导体屏蔽半导电料 …… 714
2　架空绝缘电缆技术要求 …… 714
2.1　1kV 架空绝缘电缆 …… 714
2.2　10kV 架空绝缘电缆 …… 716
3　架空绝缘电缆的特殊试验方法 …… 718
3.1　人工气候老化试验方法 …… 718
3.2　耐磨性能试验方法 …… 718
3.3　粘附力试验 …… 719
3.4　绝缘耐漏电痕迹试验方法 …… 719
4　架空绝缘电缆的载流量 …… 719
第 3 章　输配电用架空导线 …… 720
1　绞线的绞合规则 …… 720
1.1　简单绞合 …… 720
1.2　组合绞合 …… 720
1.3　复合绞合 …… 720
1.4　特殊绞合 …… 720
2　圆形单线的参数及性能 …… 721
2.1　铜单线 …… 721
2.2　铝单线 …… 721
2.3　铝合金线 …… 721
2.4　铝包钢线 …… 721
2.5　铜包钢线 …… 722
2.6　镀锌钢线 …… 722
3　输电架空导线的参数及性能 …… 723
3.1　圆线同心绞架空导线 …… 723
3.2　关于 GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》标准的补充文件 …… 734
3.3　型线同心绞架空导线 …… 739
3.4　其他架空导线、地线 …… 740
4　架空导线的试验 …… 742
4.1　试验项目 …… 742
4.2　光纤复合架空地线的部分型式试验方法简述 …… 743
第 4 章　绕组线 …… 744
1　绕组线的结构 …… 744
1.1　绕组线的导体 …… 744
1.2　绕组线的绝缘 …… 745
2　绕组线品种及性能 …… 746
2.1　漆包圆绕组线 …… 746
2.2　漆包扁绕组线 …… 751
2.3　玻璃丝包线 …… 752
2.4　纸包线 …… 754
2.5　丝包线 …… 755
2.6　纸绝缘漆包换位导线 …… 756
2.7　潜水电机绕组线 …… 757
2.8　聚酰亚胺—氟 46 复合薄膜绕包圆铜线 …… 760
2.9　200 级聚酰亚胺—氟 46 复合薄膜绕包铜扁线 …… 761
2.10　无机绝缘绕组线 …… 761
3　绕组线的试验 …… 762
第 5 章　电气装备用电线及电缆 …… 763
1　电气装备用电线及电缆的基本结构 …… 763
1.1　导体 …… 763
1.2　绝缘 …… 764
1.3　金属屏蔽 …… 765
1.4　护套 …… 765
1.5　铠装 …… 765
1.6　加强构件 …… 765
1.7　常用的绝缘和护套材料的选择和比较 …… 765
2　电气装备用电线电缆品种及技术指标 …… 766
2.1　通用聚氯乙烯绝缘电线电缆 …… 767
2.2　铜芯聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线电缆 …… 771

2.3 通用橡皮绝缘电线电缆 …… 772
2.4 电焊机电缆 …… 777
2.5 电梯电缆 …… 777
2.6 电机绕组引接软电缆和软线 …… 779
2.7 矿物绝缘电缆及火灾模拟试验 …… 780
2.8 生活用恒功率加热电缆 …… 782
2.9 工业用伴热电缆 …… 784
2.10 高层建筑用预制型分支电缆 …… 784
2.11 矿用橡套软电缆 …… 785
2.12 潜油泵电缆 …… 788
2.13 承荷探测电缆 …… 791
2.14 热电偶用补偿导线 …… 791
2.15 控制和信号电缆及其技术进步 …… 792
2.16 公路车辆用低压电线和电缆 …… 792
2.17 公路车辆用高压点火电线 …… 794
2.18 机车车辆用电缆 …… 794
2.19 航空航天电缆 …… 797
2.20 船用电缆 …… 803
2.21 变频电机用馈电电缆 …… 806
2.22 核电站用 1E 级电缆 …… 806
2.23 直流高压小电流（包括瞬间脉冲大电流）软电缆 …… 807
2.24 耐高温电缆 …… 808
2.25 环保电缆的发展 …… 808
3 电气装备用电线电缆的试验 …… 810
3.1 试验种类 …… 810
3.2 试验项目汇总 …… 810
第 6 章 通信电缆和通信光缆 …… 813
1 通信电缆的基本结构及常用性能参数定义 …… 813
1.1 通信电缆的导体 …… 813
1.2 通信电缆的绝缘 …… 814
1.3 线对和线组的绞合 …… 816
1.4 线对和线组的屏蔽 …… 816
1.5 缆芯的结构（成缆） …… 816
1.6 通信电缆的护层 …… 817
1.7 通信电缆的铠装 …… 817
1.8 自承式结构 …… 819
1.9 通信电缆常用性能参数的定义 …… 819
2 通信电缆的品种、规格和性能指标 …… 820
2.1 市内通信电缆 …… 820
2.2 长途对称通信电缆 …… 822
2.3 电话用户通信线 …… 825
2.4 电信设备装置用通信电线电缆 …… 826
2.5 同轴综合通信电缆 …… 826
2.6 射频电缆（同轴型） …… 828
2.7 数字通信电缆 …… 832
2.8 海底通信电缆 …… 834
3 通信电缆的选用、敷设和测试 …… 834
3.1 通信电缆的选用 …… 834
3.2 通信电缆的敷设方式及其结构的选择 …… 835
3.3 通信电缆敷设时的注意事项 …… 835
3.4 通信电缆接续时的注意事项 …… 835
3.5 通信电缆的测试 …… 835
4 通信光缆 …… 836
4.1 光纤的基本概念 …… 836
4.2 光纤的分类 …… 836
4.3 光纤的特性 …… 837
4.4 光缆的结构 …… 837
4.5 光缆按敷设和用途的品种分类 …… 838
4.6 光缆主要品种的型号和名称 …… 839
4.7 光缆的光学和传输特性 …… 839
4.8 光缆的力学性能 …… 840
4.9 光缆的环境性能 …… 840
4.10 几种常用光纤的性能数据 …… 841
4.11 光缆的接续 …… 841
4.12 光缆的试验 …… 842
参考文献 …… 843

第 6 篇 电池 …… 845

第 1 章 概述 …… 847
1 电池和电池组的组成 …… 847
2 电池的分类 …… 847
2.1 原电池 …… 847
2.2 蓄电池 …… 847
2.3 贮备电池 …… 847
2.4 燃料电池 …… 847
3 电池的主要性能参数及相关术语 …… 847
3.1 容量 …… 847
3.2 电压 …… 848
3.3 能量和比能量 …… 849
3.4 功率和比功率 …… 850
4 影响电池性能的因数 …… 850
5 电池的选择和应用 …… 850
5.1 电池的选择 …… 850
5.2 电池的应用 …… 850
第 2 章 原电池 …… 852
1 电化学体系和特性 …… 852
2 性能价格比 …… 853
3 国际标准体系 …… 854
第 3 章 锌负极电池 …… 855
1 锌/二氧化锰电池 …… 855
1.1 化学原理 …… 855
1.2 电池的电化学体系类型 …… 855
1.3 电池结构 …… 856
1.4 工作特性 …… 857
1.5 电池的型号、尺寸及其特性 …… 857
2 碱性锌/二氧化锰电池 …… 857
2.1 化学原理 …… 858
2.2 电池结构 …… 858
2.3 工作特性 …… 859
2.4 电池的型号、尺寸及其特性 …… 860
2.5 高级碱性锌/二氧化锰高放电率电池 …… 860
3 锌/氧化银（扣式）原电池 …… 861
3.1 化学原理 …… 861
3.2 电池结构 …… 861
3.3 工作特性 …… 861
3.4 扣式锌/氧化银电池的型号和尺寸及其特性 …… 862
4 其他锌负极原电池 …… 862
4.1 锌/氧化汞电池 …… 862
4.2 锌/空气电池 …… 863
4.3 锌/氧化镍（Oxyhydroxide）电池 …… 863

第4章　金属/空气电池 …… 864
1　锌/空气电池——扣式电池 …… 864
1.1　化学原理 …… 864
1.2　电池结构 …… 865
1.3　工作特性 …… 865
1.4　电池的尺寸、型号与特性 …… 866
2　锌/空气电池——方形和圆柱形电池 …… 866
2.1　便携式锌/空气原电池 …… 866
2.2　工业锌/空气原电池 …… 866
2.3　混合空气/氧化锰原电池 …… 867
2.4　负极可更换式锌/空气电池 …… 867
3　铝/空气电池 …… 868
3.1　中性电解质铝/空气电池 …… 868
3.2　碱性电解质铝/空气电池 …… 868
4　镁/空气电池 …… 869
5　锂/空气电池 …… 869
第5章　锂原电池 …… 870
1　锂原电池的分类与安全注意事项 …… 870
1.1　锂原电池的分类 …… 870
1.2　锂原电池的安全注意事项 …… 870
2　锂二氧化硫（Li/SO_2）电池 …… 871
2.1　化学原理 …… 871
2.2　电池结构 …… 871
2.3　工作性能 …… 871
2.4　电池产品的型号和尺寸 …… 872
3　锂/亚硫酰氯（$Li/SOCl_2$）电池 …… 872
3.1　化学原理 …… 872
3.2　电池结构 …… 873
3.3　工作性能 …… 873
3.4　电池的型号、尺寸及其特性 …… 874
3.5　$Li/SOCl_2$ 电池的衍生产品系列 …… 875
4　锂/二氧化锰（Li/MnO_2）电池 …… 875
4.1　化学原理 …… 875
4.2　电池结构 …… 875
4.3　工作性能 …… 876
4.4　Li/MnO_2 电池的型号、尺寸和特性 …… 877
5　锂/氟化碳[$Li/(CF)_n$]电池 …… 878
5.1　化学原理 …… 878
5.2　电池结构 …… 878
5.3　工作性能 …… 878
5.4　锂/一氟化碳[$Li/(CF)_n$]电池的型号、尺寸与特性 …… 878
6　锂/二硫化铁(Li/FeS_2)电池 …… 879
6.1　化学原理 …… 879
6.2　电池结构 …… 879
6.3　工作性能 …… 879
6.4　电池型号与应用 …… 880
7　固体电解质锂原电池 …… 880
7.1　锂/碘固体电解质电池 …… 880
7.2　$Li/LiI(Al_2O_3)$/金属盐固态电池 …… 881
第6章　贮备电池 …… 882
1　贮备电池 …… 882
1.1　贮备电池的基本特点 …… 882
1.2　贮备电池的分类与应用 …… 882
2　水激活电池 …… 882
2.1　镁/氯化银贮备电池 …… 882
2.2　镁/氯化亚铜贮备电池 …… 883
3　电解质激活电池 …… 883
3.1　自动激活锌/氧化银贮备电池 …… 883
3.2　自动激活双极性锌银贮备电池 …… 884
3.3　安瓿型贮备电池 …… 884
4　热电池 …… 885
4.1　镁/五氧化二钒热电池 …… 885
4.2　钙/硫酸铅热电池 …… 885
4.3　钙—铬酸钙热电池 …… 885
4.4　锂合金—硫化铁热电池 …… 885
5　LAN/硫化物热电池 …… 885
第7章　蓄电池 …… 886
1　蓄电池的类型和基本特性 …… 886
2　不同蓄电池体系的特性比较 …… 887
2.1　不同蓄电池体系的电压和典型放电曲线比较 …… 887
2.2　不同蓄电池体系的温度特性的比较 …… 888
2.3　不同蓄电池体系的荷电保持能力的比较 …… 888
2.4　不同体系蓄电池的循环寿命比较 …… 888
2.5　不同蓄电池体系的充电特性比较 …… 888
2.6　不同蓄电池体系的成本比较 …… 889
第8章　铅酸电池 …… 890
1　铅酸电池的类型和特征 …… 890
2　铅酸蓄电池工作原理 …… 890
2.1　铅酸蓄电池中的化学反应过程 …… 890
2.2　铅酸蓄电池电解质密度选择及其在电池中的作用 …… 891
2.3　铅酸蓄电池自放电产生的机理 …… 891
3　电池结构和主要部件 …… 891
3.1　电池结构类型 …… 891
3.2　电池的典型内部结构 …… 892
3.3　电池的关键部件 …… 892
4　电池制造工艺流程简介 …… 893
5　起动型（SLI）电池 …… 893
5.1　结构及关键组成 …… 893
5.2　工作性能 …… 894
5.3　SLI铅酸电池和电池组型号、尺寸 …… 894
6　牵引型铅酸蓄电池 …… 897
6.1　电池结构 …… 897
6.2　工作性能 …… 897
6.3　电池型号和尺寸 …… 898
7　固定型铅酸蓄电池 …… 898
7.1　电池结构 …… 898
7.2　工作性能 …… 899
7.3　电池及电池组型号和尺寸 …… 899
8　阀控式铅酸蓄电池 …… 900
8.1　工作原理与分类 …… 900
8.2　电池结构 …… 901
8.3　工作性能 …… 901
8.4　电池型号和尺寸 …… 903
9　维护与安全运行 …… 903
9.1　工业开口型铅酸电池维护 …… 903
9.2　备用阀孔式密封铅酸电池使用中的注意事项 …… 904
9.3　安全问题 …… 905
第9章　碱性蓄电池 …… 907

1 镉镍蓄电池 …… 907
1.1 化学原理 …… 907
1.2 有极板盒式开口电池 …… 908
1.3 纤维镍基体电池（简称 FNC 电池） …… 909
1.4 开口烧结式镉/镍电池 …… 910
1.5 密封镉/镍电池 …… 911
2 氢镍电池 …… 915
2.1 工作原理 …… 915
2.2 电池结构 …… 915
2.3 电池分类 …… 915
2.4 电池应用 …… 915
3 金属氢化物/镍电池 …… 915
3.1 工作原理 …… 916
3.2 电池结构 …… 916
3.3 关键材料、关键部件及电极的工艺 …… 917
3.4 工作性能 …… 918
3.5 充电方法和充电电路 …… 920
3.6 金属氢化物/镍电池的应用及前景 …… 921
4 铁镍蓄电池 …… 924
4.1 工作原理 …… 924
4.2 结构与组成 …… 924
4.3 工作性能 …… 925
4.4 电池产品尺寸与特性 …… 925
5 锌氧化银蓄电池 …… 926
5.1 工作原理 …… 926
5.2 电池结构和分类 …… 926
5.3 工作性能 …… 926
6 锌镍蓄电池 …… 927
6.1 工作原理 …… 927
6.2 电池结构与组成 …… 927
6.3 工作性能 …… 928
第 10 章 锂蓄电池与锂离子蓄电池 …… 929
1 锂蓄电池 …… 929
1.1 锂蓄电池体系分类 …… 929
1.2 特定的锂蓄电池品种及其特性 …… 930
1.3 正在发展和具有应用前景的锂蓄电池体系 …… 933
2 锂离子电池 …… 934
2.1 工作原理与电池反应 …… 935
2.2 电池结构、关键材料和电池制造工艺流程 …… 936
2.3 锂离子电池的性能 …… 939
2.4 聚合物锂离子电池 …… 942
2.5 大容量和高功率锂离子电池 …… 944
2.6 锂离子电池的安全分析与注意事项 …… 949
3 固体薄膜锂蓄电池 …… 950
3.1 固体薄膜锂蓄电池的结构与组成 …… 950
3.2 固体薄膜锂蓄电池的制备方法 …… 951
3.3 固体薄膜锂蓄电池的基本特性 …… 951
3.4 固体薄膜锂蓄电池的应用与发展前景 …… 951
第 11 章 钠/硫电池 …… 953
1 工作原理 …… 953
2 典型结构 …… 953
3 基本特性 …… 954
4 典型产品的尺寸、主要特性与应用 …… 955
4.1 典型产品的尺寸和主要特性 …… 955
4.2 应用领域及典型应用范例 …… 955
5 使用注意事项 …… 957
5.1 电池的串并联 …… 957
5.2 热控制管理系统 …… 957
5.3 电池安全性 …… 958
第 12 章 其他新型电化学贮能装置和器件 …… 959
1 电化学电容器 …… 959
1.1 电化学电容器的原理、分类与发展简史 …… 959
1.2 电化学电容器的结构和基本组成以及组合形式 …… 960
1.3 电化学电容器的特性 …… 960
1.4 电化学电容器的应用与发展前景 …… 962
2 液体流动氧化还原贮能电池 …… 962
2.1 液体流动全钒氧化还原贮能电池的基本原理与发展简史 …… 962
2.2 液体流动全钒氧化还原贮能电池的基本结构与组成 …… 962
2.3 液体流动全钒氧化还原贮能电池的特点与典型性能 …… 963
2.4 液体流动全钒氧化还原贮能电池的产品开发与应用 …… 963
第 13 章 燃料电池 …… 964
1 燃料电池的原理、构成、分类与特性 …… 964
1.1 燃料电池的基本工作原理 …… 964
1.2 燃料电池的发电单元与体系构成 …… 964
1.3 燃料电池基本分类 …… 965
1.4 燃料电池的基本特性 …… 965
2 碱性电解质燃料电池 …… 965
3 质子交换膜电解质燃料电池 …… 966
3.1 氢氧或氢空气质子交换膜电解质燃料电池 …… 966
3.2 甲醇直接燃料电池 …… 968
3.3 再生式燃料电池（RFC） …… 969
4 磷酸燃料电池 …… 969
5 熔融碳酸盐燃料电池（MCFC） …… 970
6 固体电解质燃料电池 …… 970
6.1 工作原理 …… 970
6.2 固体氧化物燃料电池的结构和主要组成 …… 971
6.3 关键部件及材料 …… 971
6.4 电池和电池组的性能 …… 971
7 燃料电池技术发展与应用前景 …… 972
第 14 章 太阳电池 …… 973
1 太阳电池的基本结构与种类 …… 973
2 基本知识 …… 974
2.1 太阳辐射 …… 974
2.2 晶体结构 …… 974
2.3 能带结构 …… 974
2.4 载流子浓度及连续性方程 …… 974
2.5 PN 结 …… 975
3 太阳电池的工作原理 …… 975
3.1 太阳电池的电路模型 …… 975
3.2 短路电流与开路电压 …… 976
3.3 光谱响应 …… 976
4 太阳电池效率限制因素 …… 977
第 15 章 单晶硅太阳电池 …… 979
1 硅太阳电池的发展简史 …… 979
2 硅太阳电池的基本结构及种类 …… 979
2.1 硅太阳电池的基本结构 …… 979
2.2 硅太阳电池的种类 …… 979

3　硅太阳电池的制造工艺简介 …… 980
3.1　硅材料制备 …… 980
3.2　衬底准备 …… 980
3.3　掺杂 …… 981
3.4　减反射膜 …… 981
3.5　绒面及陷光结构 …… 981
3.6　电极 …… 981
3.7　工艺过程 …… 982
3.8　薄型太阳电池简介 …… 982
4　硅太阳电池的基本特性 …… 982
4.1　伏安特性 …… 982
4.2　光谱响应特性 …… 983
4.3　光电转换效率 …… 983
4.4　温度特性 …… 983
第 16 章　砷化镓太阳电池 …… 984
1　砷化镓太阳电池的发展简史 …… 984
2　砷化镓太阳电池的基本结构及种类 …… 984
2.1　单结砷化镓太阳电池 …… 984
2.2　双结砷化镓太阳电池 …… 984
2.3　三结砷化镓太阳电池 …… 985
3　三结砷化镓太阳电池的组成 …… 985
3.1　GaInP 太阳电池 …… 985
3.2　GaAs 电池 …… 985
3.3　锗电池 …… 985
3.4　异质结 …… 986
3.5　隧穿结 …… 986
4　MOCVD 设备 …… 986
5　砷化镓太阳电池的基本特性 …… 986
5.1　伏安特性 …… 986
5.2　光谱响应特性 …… 986
5.3　太阳电池效率 …… 986
5.4　温度特性 …… 987
第 17 章　薄膜太阳电池 …… 988
1　非晶硅薄膜电池 …… 988
1.1　发展简史 …… 988
1.2　电池结构 …… 988
1.3　工艺过程 …… 988
1.4　电池性能 …… 989
2　CIS 电池 …… 989
2.1　发展简史 …… 989
2.2　电池结构 …… 989
2.3　工艺过程 …… 989
2.4　电池性能 …… 991
3　CdTe 电池 …… 991
3.1　发展简史 …… 991
3.2　电池结构 …… 991
3.3　工艺过程 …… 991
3.4　电池性能 …… 992
第 18 章　温差发电器 …… 993
1　温差发电器的特点及应用 …… 993
1.1　温差发电器的特点 …… 993
1.2　温差发电器的分类 …… 993
1.3　温差发电器的应用 …… 993
2　温差发电基本理论 …… 993
2.1　温差电效应 …… 993
2.2　温差发电原理 …… 994
3　温差电材料 …… 995
3.1　重要的温差电材料 …… 995
3.2　温差电材料制备工艺 …… 998
4　温差电换能器的设计 …… 1000
4.1　一般考虑 …… 1000
4.2　温差电换能器参数设计 …… 1000
5　温差发电器的结构 …… 1001
5.1　温差发电组件 …… 1001
5.2　中温温差发电器 …… 1001
5.3　高温温差发电器 …… 1002

中国电气工程大典

CHINA ELECTRICAL ENGINEERING CANON

第3卷
电气工程材料及器件

第1篇 绝缘材料

主编单位：桂林电器科学研究所

四川东材科技集团股份有限公司

主　　编：李耀星　赵　平

编写人员：许自贵　文清云　刘　峰　李杰霞　罗春明

龚　诚　（四川东材科技集团股份有限公司）

朱梅兰　梁亚东　王明军　刘建文　钟立松

（桂林电器科学研究所）

陈　维　（西安交通大学）

张秀丽　丁国东　赵华娟　王立平　王丽洁

（哈尔滨庆缘电工材料股份有限公司）

黄有根　（株洲时代电气绝缘有限责任公司）

陆银福　（上海电机(集团)公司绝缘材料厂）

赵立东　杜超云　张银川

（西安西电电工材料有限公司）

吕伟琴　（杭州泰达实业有限公司）

金谢锋　（北京新福润达绝缘材料有限责任公司）

第1章 概 述

1 概况

发电设备、输变电设备及用电设备（如电机、电器等）中使用的绝缘材料最初主要来源于大自然，由各类植物、无机物及矿物等材料经加工而成。自从合成材料发明以后，绝缘材料获得了突飞猛进的发展。目前发达国家的绝缘材料向多品种、多规格、功能化、精细化及高水平方向发展，每年都有许多新产品问世，并在各类性能及精度等方面获得了突破，满足了大型发电设备27kV条件下对绝缘材料的耐局部放电要求、低压电机电器工作温度250℃以上的耐热性要求、变频电机的耐电晕应用要求，满足了许多特种应用的要求。

在我国的国民经济中，绝缘材料属基础配套材料，它在发电行业、输变电行业及许多用电行业（如电机、电器、电子等）中是不可缺少的。我国的绝缘材料行业经过50多年的建设，现已发展成为一个具有较强科研和生产能力的全国性行业，产品品种有较大发展，产量居世界前列，进入绝缘材料生产大国的行列。产品水平在逐步提高，可以生产8大类50多个系列近600多个品种的绝缘材料产品。特别是近年来，通过科技攻关和技术引进，我国的绝缘材料行业基本上能够满足三峡大型水力发电机组（700MW）以及600MW及更大型火力发电机组，750kV超高压输变电设备，F级中型高压电机，E～H级中小型电机，特种电机和电子产品，低压电器等对绝缘材料的高、中、低档的要求。

JB/T 2197—1996《电气绝缘材料产品分类、命名及型号编制方法》中对绝缘材料产品分类、命名及型号编制方法进行了规定，将绝缘材料分为8个大类，即：

（1）漆、可聚合树脂和胶类。

（2）树脂浸渍纤维制品类。

（3）层压制品、卷绕制品、真空压力浸胶制品和引拔制品类。

（4）塑料类。

（5）云母制品类。

（6）薄膜、粘带和柔软复合材料类。

（7）纤维制品类。

（8）绝缘液体类。

各大类又分为若干小类，其形态和性能各异，分别应用于各行各业，小类的划分是按应用范围、应用工艺特征或组成来划分的，具体分类见表1.1-1。

表1.1-1 绝缘材料小类的划分

大类代号	大类名称	小类代号	小类名称
1	漆、可聚合树脂和胶类	0	有溶剂漆
		1	无溶剂可聚合树脂
		2	覆盖漆、防晕漆、半导电漆
		3	硬质覆盖漆、瓷漆
		4	胶粘漆、树脂
		5	溶敷粉末
		6	硅钢片漆
		7	漆包线漆、丝包线漆
		8	灌注胶、包封胶、浇铸树脂、胶泥、腻子
		9	—
2	树脂浸渍纤维制品类	0	棉纤维漆布
		1	—
		2	漆绸
		3	合成纤维漆布、上胶布
		4	玻璃纤维漆布、上胶布
		5	混织纤维漆布、上胶布
		6	防晕漆布、防晕带
		7	漆管
		8	树脂浸渍无纬绑扎带
		9	树脂浸渍适形材料
3	层压制品、卷绕制品、真空压力浸胶制品和引拔制品类	0	有机底材层压板
		1	真空压力浸胶制品
		2	无机底材层压板
		3	防晕板及导磁 层压板
		4	—
		5	有机底材层压管
		6	无机底材层压管
		7	有机底材层压棒
		8	无机底材层压棒
		9	引拔制品
4	模塑料类	0	木粉填料为主的模塑料
		1	其他有机填料为主的模塑料
		2	石棉填料为主的模塑料
		3	玻璃纤维填料为主的模塑料
		4	云母填料为主的模塑料
		5	其他有机填料为主的模塑料
		6	无填料塑料
		7	—
		8	—
		9	—
5	云母制品类	0	云母纸
		1	柔软云母板
		2	塑型云母板
		3	—
		4	云母带

续表

大类代号	大类名称	小类代号	小 类 名 称
5	云母制品类	5	换向器云母板
		6	电热设备用云母板
		7	衬垫云母板
		8	云母箔
		9	云母管
6	薄膜、粘带和柔软复合材料类	0	薄膜
		1	薄膜上胶带
		2	薄膜粘带
		3	织物粘带
		4	树脂浸渍柔软复合材料
		5	薄膜绝缘纸柔软复合材料、薄膜漆布柔软复合材料
		6	薄膜合成纤维纸柔软复合材料、薄膜合成纤维非织布柔软复合材料
		7	多种材质柔软复合材料
		8	—
		9	—
7	纤维制品类	0	非织布
		1	合成纤维纸
		2	绝缘纸
		3	玻璃纤维制品
		4	纤维毡
		5	—
		6	—
		7	—
		8	—
		9	—
8	绝缘液体类	0	合成芳香烃绝缘液体
		1	有机硅绝缘液体
		2	—
		3	—
		4	—
		5	—
		6	—
		7	—
		8	—
		9	—

绝缘材料的型号按一定的规则编制，如3240层压板，其中的“3”表示大类：层压制品、卷绕制品、真空压力浸胶制品和引拔制品；“2”表示小类：无机底材层压板；“4”表示温度指数：不低于155（F级）；“0”表示该产品的品种代号。

GB/T 11021—1989《电气绝缘的耐热性评定和分级》中还规定绝缘材料产品可按温度指数分类，温度指数分级代号见表1.1-2。但第5大类中第0小类（云母纸）及第6小类（电热设备用云母板）、第7大类中的第2小类（绝缘纸）及第3小类（绝缘纸板）、第8大类产品除外。

表1.1-2 电气绝缘材料的温度指数分级代号

代 号	GB/T 11021—1989分级	温度指数
1	Y级	不低于90
2	A级	不低于105
3	E级	不低于120
4	B级	不低于130
5	F级	不低于155
6	H级	不低于180
7	200级	不低于200
8	220级	不低于220
9	250级	不低于250

温度指数是选用绝缘材料的参考依据，应当根据电气设备的工作温度选择其级别，如电机的工作温度为150℃，应当选择F级的材料。但选择不同的绝缘结构，其选择的原则略有不同，如德国人曾选聚酯薄膜（B级材料）用于F级电机中，原因是与其搭配的另一种材料是H级的材料，两者配合可以用于F级电机中。两者之间的相容性对绝缘材料的选择也是很重要的，如电机中的两种材料相容性不好，则其$\Delta\tan\delta$要增大，会出现电机发热严重等问题。

2 相关术语及定义

2.1 绝缘材料一般术语

2.1.1 绝缘材料(insulating material; insulant)

用于防止导电元件之间导电的材料(电磁学领域中，术语“insulant”也作为“insulating material ”的同义词)。

2.1.2 绝缘液体(insulating liquid)

用于防止导电元件之间导电的液体。

2.1.3 绝缘气体(insulating gas)

用于防止导电元件之间导电的气体。

2.1.4 电介质 (dielectric)

能够被电场极化的物质，在特定频带内，时变电场在其内给定方向上产生的传导电流密度分矢量值远小于在该方向上的位移电流密度的分矢量值。

2.1.5 电气绝缘件(electrical insulation)

电工产品中用以隔离不同电位的导电体的部件。

2.1.6 树脂(resin)

其分子质量不确定但通常是较高的一种固体、半固体或准固体的有机材料，承受应力时有流动倾向，通常有一个软化或熔化范围，且断面常呈现贝壳状。从广义上讲，凡作为塑料基材的任何聚合物都可称为树脂(用于浸渍而后固化的液体也称之为“树脂”)。

2.1.7 塑料(plastic)

以聚合物为主要组分，在其加工成为成品的某些阶段可通过流动成型的材料(也可通过流动成型的弹性体材料不能认为是塑料)。

2.1.8 热塑性塑料(thermoplastic)

在特定温度范围内，能通过反复加热软化、冷却又变硬的塑料。在软化阶段用模压、挤出或成型的方法实现流动，且能反复成型。

2.1.9 热固塑料(thermoset)

用加热或其他方法固化后能转变成完全不熔和不溶的塑料(热固塑料在固化前常称为热固性塑料，固化后称为热固塑料)。

2.1.10 浸渍(impregnating)

用液体来填充绝缘材料或组合体材料中的缝隙和气孔的

过程(浸渍后液体可能保持液态或变成固态)。

2.1.11 浇铸(casting)

无需外施压力，将液体或黏性材料浇入或以别的方式注入到模具或注入到准备好的表面上，以便固化的工艺过程。

2.1.12 灌注(potting)

模具留在埋封件上的一种埋封工艺。

2.1.13 流化床涂敷(fluidized bed coating)

涂敷工艺为下述之一：①通常将预热后待涂件置入塑料粉末流化床中，接着使粘附的塑料粉末溶融；②将至少能轻微导电的待涂件接地，于冷态置入带静电的塑料粉末流化床中，粉末吸附在待涂件上，随后加热使粘附的粉末熔融。

2.2 绝缘材料电气性能术语

2.2.1 介电性能(dielectric property)

在电场作用下，电气绝缘材料表现出来的电气特性(主要的介电性能有体积电阻率、相对电容率、损耗因数、电气强度等)。

2.2.2 绝缘电阻(insulation resistance)

在规定条件下，处于两个导体之间的绝缘材料的电阻。

2.2.3 体积电阻(volume resistance)

排除表面电流后由体积导电所确定的绝缘电阻部分。

2.2.4 体积电阻率(volume resistivity)

折算成单位立方体积时的体积电阻[根据 IEC 60050(121)，电导率定义为与电场强度的乘积是传导电流密度的标量或张量，电阻率定义为电导率的倒数。测量中绝缘材料体积中各点可能不均匀，体积电阻率是其平均值，也包括了电极上可能存在的极化现象的影响]。

2.2.5 表面电阻(surface resistance)

由表面导电所确定的绝缘电阻部分(表面电阻一般受环境的影响较大；电化时间常以不确定的方式对表面电流施加剧烈影响，测量时电化时间常取 1min)。

2.2.6 表面电阻率(surface resistivity)

折算成单位面积时的表面电阻。表面电阻率值受可能存在的电极极化的影响；表面电阻率的数值与该单位面积的大小无关。

2.2.7 电极(electrode)

与电导率较低的介质接触的导电零件，其作用是向介质发射载流子或从介质接受载流子或在电介质中建立电场。

2.2.8 测量电极(measuring electrode)

置于或插入材料中并与材料接触，以便测量材料介电性能的一种导体。

2.2.9 [体积]直流电阻[(volume)D.C. resistance]

在接触绝缘介质的两电极之间施加的直流电压，对给定电化时间时通过绝缘介质的电流之商。

2.2.10 [体积]直流电阻率[(volume) D.C. resistivity]

直流电场强度对给定电化时间时绝缘介质中的电流密度之商。

2.2.11 电化(electrification)

在接触绝缘电介质的两电极间，施加电压的过程。

2.2.12 电化电流(electrification current)

在绝缘介质相接触的两电极之间，施加直流电压时流过的电流。

2.2.13 电导电流(conduction current)

电化电流中的稳态分量。

2.2.14 极化电流(polarization current)

电化电流中的暂态分量(测量极化电流时，通常先将电极短路足够长时间，以使短路电流衰减到可忽略不计)。

2.2.15 去极化电流(depolarization current)

在接触绝缘介质的两电极之间施加直流电压，经一定时间电化后，将两电极短路时所通过的电流(测量去极化电流时，通常取电化时间足够长，让极化电流衰减到可忽略不计)。

2.2.16 去电化电流(de-electrification current)

两个电极置于绝缘介质上后立刻短路时，或在两个电极彼此不连接也不接电源的情况下放置一定时间后短路时，所形成的短路电流(绝缘介质的残余极化或静电电荷都可能产生去电化电流)。

2.2.17 介质损耗(dielectric loss)

极化的物质从时变电场吸收的功率，不包括由于物质电导率所吸收的功率。

2.2.18 绝对电容率(absolute permittivity)、绝对介电常数 ε (absolute constant)

标量或张量，在介质中该量与电场强度之积等于电通量密度(对于各向同性介质，电容率是标量，对于各向异性介质，电容率是张量)。

2.2.19 相对电容率(relative permittivity)、相对介电常数(dielectric constant、decrecated)

ε_r标量或张量，等于绝对电容率 ε 除以电常数 ε_0(工程上常用的"电容率"是指相对电容率)。

2.2.20 复相对电容率(complex relative permittivity)、复相对介电常数(complex relative constant)

在正弦条件下，电介质中电通量密度相量 $\underline{D}$ 和电场强度相量 $\underline{E}$ 是线性关系时，复数量$\underline{\varepsilon_r}$由下式定义

$$\underline{D} = \varepsilon_0 \, \underline{\varepsilon_r} \underline{E}$$

式中：ε_0 为电常数。

$\underline{\varepsilon_r}$通常与频率有关，对于各向同性介质，$\underline{\varepsilon_r}$是标量，对于各向异性介质，$\underline{\varepsilon_r}$是张量；$\underline{\varepsilon_r}$通常表示为

$$\underline{\varepsilon_r} = \underline{\varepsilon'_r} - \mathrm{j}\,\underline{\varepsilon''_r}$$

式中：$\underline{\varepsilon'_r}$为实相对电容率；$\underline{\varepsilon''_r}$为介质损耗指数。

2.2.21 实相对电容率(real relative permittivity)、实相对介电常数(real relative constant)ε'_r

复相对电容率的实部。

2.2.22 [介质]损耗指数[(dielectric) loss index]ε''_r

复相对电容率虚部的负值。

2.2.23 介质损耗因数(dielectric dissipation factor)、介质损耗角正切(loss tangent)tan δ

介质损耗指数 ε''_r 对实相对电容率 ε'_r 之比值。

2.2.24 [介质]品质因数[Q-factor (of dielectric)]

无功功率的绝对值与有功功率的比。介质损耗因数的倒数。

2.2.25 介质损耗角(dielectric loss angle)

在各向同性介质中，该角的正切等于介质损耗因数

$$\delta_c = \arctan[\varepsilon''_r/\varepsilon'_r]$$

2.2.26 有效复相对电容率(effective complex relative permittivity)、有效复相对介电常数(effective complex relative constant)ε_{re}

在正弦条件下，介质中电通量密度相量 $\underline{D}$、电场强度相量 $\underline{E}$ 和电流密度相量 $\underline{J}$ 是线性关系时，复数量 ε_{re} 由下式定义

$$\varepsilon_0 \, \underline{\varepsilon_{re}} \, \underline{E} = \underline{D} + \underline{J}/\mathrm{j}\omega = D - \mathrm{j}\,\underline{\gamma E}/\omega$$

式中：γ 为介质电导率；ω 为角频率；ε_0 为电常数。

$\underline{\varepsilon}_{re}$一般与频率有关，各向同性介质的$\underline{\varepsilon}_{re}$是标量，各向异性介质的$\underline{\varepsilon}_{re}$是张量；$\underline{\varepsilon}_{re}$与$\underline{\varepsilon}_{r}$的关系为

$$\underline{\varepsilon}_{re} = \underline{\varepsilon}_{r} - j\gamma/\omega\varepsilon_0$$

在导电介质中，包括良导体和不完全电介质，有用的和可测量的量是$\underline{\varepsilon}_{re}$；$\underline{\varepsilon}_{re}$的虚部的负值代表介质损耗和电导率产生的损耗，后者由$\gamma/\omega\varepsilon_0$表示。

2.2.27 静态电容率(static permittivity)、静态介电常数(static constant)

稳态直流电场条件下的电容率。

2.2.28 [电气]击穿[(electric) breakdown]

在电场作用下，绝缘介质绝缘性能的丧失或暂时丧失的现象

[电气]击穿包括电击穿、热击穿和电化学击穿；在电磁学术语中，把"[电气]击穿"称为"[电]击穿"。

2.2.29 击穿电压(breakdown voltage)

在规定的试验条件下或在使用中发生击穿时的电压。

2.2.30 耐电压(proof voltage; withstand voltage)

在规定的试验条件下，施加在试样上不引起击穿和/或闪络的电压。

2.2.31 电气强度(electric strength)

在规定的试验条件下，两导体之间所施加的不导致击穿的最高电压，对该两导体之间距离之商。

2.2.32 放电(electrical discharge)

由电子雪崩开始，二次过程为补充，使载流子穿过原为绝缘介质的不连续运动。

2.2.33 局部放电(partial discharge)

导体间绝缘介质内部所发生的局部击穿的一种放电。该放电可能发生在绝缘内部或邻近导体的地方(术语"电离"描述任何产生离子的过程，不用于局部放电的表述)。

2.2.34 内部放电(internal discharge)

绝缘介质内部空隙里的局部放电，可能发生在导体附近。

2.2.35 表面放电(surface discharge)

在绝缘表面上方或沿着绝缘表面的局部放电。

2.2.36 闪络(flashover)

在气体、液体或真空中发生的部分沿着固体绝缘表面的击穿。

2.2.37 火花放电(sparkover)

在两个电极之间气体或液体内发生的击穿。

2.2.38 电穿孔(puncture)

固体电气击穿时形成的永久性损坏通道，该术语也用作固体电击穿的同义词。

2.2.39 电晕(corona)

在紧靠裸导体或绝缘较差导体的表面的气体中，因该导体远离其他导体而产生强发散电场，使该部位出现的局部放电。电晕通常伴随发光和噪声。

2.2.40 局部放电强度(partial discharge intensity)

用来描述在给定条件下放电的量的统称。

2.2.41 耐电弧性(arc resistance)

在规定的条件下，绝缘材料耐受电弧沿其表面作用的能力。

2.2.42 电痕化(tracking)

因局部放电形成的导电或部分导电的通道，使固体绝缘材料表面逐步降解的过程(电痕化通常与材料表面污染物有关)。

2.2.43 电痕化时间(time-to-track)

电痕化试验中达到规定的电痕化临界终点的时间。

2.2.44 相比电痕化指数(comparative tracking index, CTI)

在规定的试验条件下，材料能承受而不电痕化的最高电压数值。

2.2.45 耐电痕化指数(proof tracking index, PTI)

在规定的试验条件下，材料能承受的不出现电痕的电压数值。

第2章 漆、树 脂

绝缘用漆（或绝缘漆）是电气绝缘漆的简称。现代绝缘漆是一种可含或不含溶剂的液体树脂体系，它能涂覆在电气零部件上以对其提供电气的、机械的和环境的保护。

根据漆的基本组成，可将绝缘漆分为两类，即有溶剂漆和无溶剂漆。有溶剂漆是一种聚合物或聚合物的混合物在可挥发的非活性溶剂中的溶液、分散液或乳浊液体。

水是一种特殊的非反应性液体，它具有无毒、不燃、价廉的特点，为了把含水漆和一般有机溶剂漆相区别，往往把这类以水作为溶剂或分散剂的漆单独列为一类，称为水性漆，而通常人们所说的有溶剂漆，实际上是有机溶剂漆的简称。

此外，绝缘漆还可按其用途、固化方式、固化反应类型、漆基的主要化学组成和耐热性等进行分类。按漆基的主要化学成分分类，就是以构成漆膜的主要树脂类型分类。按耐热性分类，可测定绝缘漆不同性能或按不同试验方法得出不止一个温度指数。

还应指出，在电气设备中，绝缘漆并不是单独使用的，而是与其他绝缘材料一起构成绝缘系统，因此，在考虑绝缘漆单一材料的耐热性时，它与其他材料的相容性是不可忽视的。表 1.2-1 给出了适用于不同耐热等级绝缘系统中的常用绝缘漆，表 1.2-2 给出了适用于不同固化方式和用途的常用绝缘漆。

表 1.2-1　　适用于不同耐热等级的常用绝缘漆

电机、电器绝缘等级	浸渍漆	覆盖漆	硅钢片漆	电磁线用漆	胶粘漆	绝缘浸渍纤维制品用漆
A级绝缘（105℃）	油性漆 沥青漆 醇酸树脂漆	油性漆 沥青漆 醇酸树脂漆	油性漆 沥青漆 醇酸树脂漆 酚醛树脂漆	油性漆 聚乙烯醇缩醛漆 聚氨酯漆	虫胶漆 油性漆 沥青漆 醇酸树酯漆	油性漆 沥青漆 醇酸树脂漆
E级绝缘（120℃）	100%油溶性酚醛树脂类漆 醇酸树脂漆	100%油溶性酚醛树脂系漆 醇酸树脂漆	油性漆 沥青漆 醇酸树脂漆 酚醛树脂漆	聚乙烯醇缩醛漆 聚氨酯漆 聚酯漆	虫胶漆 油性漆 沥青漆 醇酸树酯漆	油性漆 沥青漆 醇酸树脂漆 聚氨酯漆
B级绝缘（130℃）	100%油溶性 酚醛树脂系漆 醇酸树脂漆 不饱和聚酯漆 改性环氧树脂漆	醇酸树脂漆 环氧酯系漆 100%油溶性 酚醛树脂漆	油性漆 沥青漆 醇酸树脂漆 酚醛树脂漆	聚酯漆	酚醛环氧漆 沥青系漆 醇酸树脂漆 环氧酯系漆	油性漆 沥青系漆 醇酸树脂漆 聚氨酯漆 丙烯酸酯系漆
F级绝缘（155℃）	间苯二甲酸聚酯漆 酚醛一醇酸漆 有机硅醇酸漆 改性聚酯漆 无溶剂环氧漆 环氧酯系漆 聚氨酯漆	间苯二甲酸聚酯漆 环氧酯系漆 有机硅醇酸树脂漆	有机硅醇酸树脂漆 环氧酯系漆	聚酯亚胺漆 改性聚酯漆	环氧酯系漆 有机硅醇酸漆 间苯二甲酸聚酯漆 聚氨酯漆	间苯二甲酸聚酯漆 环氧酯系漆 有机硅醇酸漆 聚氨酯漆
H级绝缘（180℃）	有机硅树脂漆 二苯醚树脂漆 耐热聚酯漆 聚酰胺亚胺漆	有机硅树脂漆	有机硅树脂漆 聚酰胺亚胺漆	耐热聚酯漆 聚酰胺亚胺漆 聚酰亚胺漆 有机硅树脂漆	有机硅树脂漆	有机硅树脂漆 聚酰胺亚胺漆 有机硅橡胶漆 聚酰亚胺漆

表 1.2-2　　适用于不同固化方式的各类绝缘漆

种　类	漆基主要化学组成	用　途					
		线圈浸渍	覆盖	硅钢片	漆包线	胶粘	漆布（管）用
室温固化漆	虫胶	—	✓	○	—	✓	—
	酚醛树脂	—	○	—	—	✓	—
	油性类	✓	○	—	—	—	—
	沥青类	✓	○	—	—	○	—
	醇酸树脂	—	○	—	—	—	—
	聚氨酯	—	○	—	—	○	—
	环氧树脂	—	○	○	—	○	—
	醇酸树脂	—	○	—	—	○	—
	无溶剂环氧树脂	○	—	—	—	✓	—
	不饱和聚酯	○	—	—	—	—	—

续表

种类	漆基主要化学组成	用途					
		线圈浸渍	覆盖	硅钢片	漆包线	胶粘	漆布（管）用
热固化漆	沥青类	✓	○	○	—	○	○
	油性类	✓	○	○	✓	○	○
	酚醛树脂	○	○	—	—	✓	—
	100%油溶性酚醛树脂系	✓	○	—	—	○	—
	醇酸树脂	✓	○	○	—	○	○
	聚乙烯醇缩醛	—	—	—	✓	—	—
	聚氨酯	○	○	—	✓	○	○
	丙烯酸酯	—	—	—	○	—	○
	聚酰胺	—	—	—	○	—	—
	对苯二甲酸聚酯	—	—	—	✓	—	—
	耐热聚酯（改性聚酯）	✓	—	—	✓	—	—
	环氧酯系	✓	○	○	—	○	✓
	有机硅醇酸	—	○	—	○	○	○
	有机硅树脂	✓	✓	—	—	✓	✓
	二苯醚系		—	—	—	○	○
	聚酰亚胺系	—	—	—	○	—	○
	聚酰胺亚胺系		—	—	✓	—	○
	聚酯亚胺系	✓	—	—	✓	—	○
	聚四氟乙烯树脂	—	✓	—	○	—	○
	醇酸树脂	—	—	—	—	—	—
	不饱和聚酯	✓	—	—	—	○	—
	无溶剂环氧树脂	√	—	—	—	√	—
紫外线电子束固化漆	环氧丙烯酸酯	△	—	△	△	—	—
	聚酯丙烯酸酯	△	△	—	—	—	—
	聚氨酯丙烯酸酯	—	△	—	—	—	—
	有机硅丙烯酸酯	—	△	—	—	—	—

注 √—使用较多；○—用量次于前者；△—尚处试用阶段。

有机溶剂漆虽然有很好的性能，但在漆中都要使用不同品种和数量的挥发性有机溶剂，如甲苯、二甲苯、甲苯酚、溶剂汽油等。漆中使用溶剂的目的仅在于将树脂（或称漆基物）溶解为稀薄的溶液，以便于施工。当将其涂在被涂物上以后，就要求溶剂尽量挥发干净。溶剂的挥发不仅是个浪费，而且污染工作环境和大气，影响人们的健康。这些问题的存在，就为新型绝缘漆的研究和开发提出了课题。水性漆、无溶剂漆、绝缘胶以及熔敷粉末，就是针对这些问题而产生的。

水性绝缘漆在电工中的应用是从1960年开始的。水性漆的主要用途是涂制漆包线。目前，它被认为是最有前途的漆包线漆之一。用水代替或部分代替毒性有机溶剂，对改善劳动环境和减少污染公害具有很重要的意义。据国外资料分析，漆包线漆最终采用的将是水性漆和无溶剂漆，其中水性漆要占50%以上。

水溶性漆制备的机理，目前主要是利用在分子结构中含有羟基的树脂来制备水溶性漆。在分子结构中原来含有羟基的，保留它的适当数量的羟基；在分子结构中不含羟基的，设法引入适当数量的羟基，然后，用挥发性胺类（如氨水、三乙胺、乙醇胺等）与其羟基反应而将树脂变成能溶于水的皂类，这就提供了用水为溶剂的条件。为了增加树脂的水溶性、稳定性、改善漆膜的流平性，一般还要加入一定量强极性有机溶剂（如乙醇、丁醇、丁基溶纤剂等）来做助溶剂，以提高其溶解度。

用水溶性漆涂制漆包线，现行多为多次涂漆法，且最好是用电沉积（电泳）涂漆法。

无溶剂绝缘漆的工业应用是从20世纪50年代开始的。最早是将不饱和聚酯低黏度液体树脂用于大型高压电机线圈浸渍。由于在收缩率、对铜的粘结力和热态电气性能方面，不饱和聚酯不如无溶剂的环氧树脂漆，故在大型高压电机真空压力浸渍工艺中，不饱和聚酯逐渐为环氧漆所完全取代。在这一过程中，不饱和聚酯漆的应用则转向低压中小型电机电器的浸渍绝缘处理，从而部分地替代了传统的有溶剂浸渍漆。

无溶剂漆的概念也就是在这种情况下才逐渐地确定下来。无溶剂漆与有溶剂漆相比，具有内干性好，浸烘时间短，导热性好，绝缘层无气隙，浸渍工艺便于采用机械化和自动化，可显著减少环境污染等优点，在技术上和经济上显示了很大的优越性。因此，无溶剂漆在电工领域中获得了广泛的应用。从应用角度看，除传统的沉浸工艺外，无溶剂漆所特有的滴浸工艺得到了很快的发展，出现了适用于不同形式绕组的各种类型的滴浸设备，使浸渍漆烘焙周期大大缩短。同时，耐热性好、挥发份小、闪点高、毒性小的所谓低臭气型无溶剂漆的研究与应用受到重视。经验表明，在一些场合，用无溶剂漆取代有溶剂绝缘漆优势是明显的。

浸渍漆的基本技术条件是：

（1）黏度低，固体含量高，以保证有好的浸透性和对空隙的填充能力。溶剂等组分的挥发，固化过程中浸入树脂的流失，都影响填充的效果。

（2）储存稳定性好。特别是对于沉浸用漆，必须有符合使用要求的黏度稳定性。

（3）适当的固化（干燥）特性。内干性好、固化快、固化温度低等，以提高绝缘性能，缩短浸烘周期，节省能源，避免由于烘焙温度过高而造成的对其他绝缘材料的热损伤。

（4）粘结力好，机械强度高，漆膜应有良好的韧性。电机电器在运行或使用过程中，需承受各种原因引起的机械应力的作用。绝缘系统力学性能不好，就会造成线圈松动、变形而导致绝缘的损坏。因此，对于线圈浸渍漆，特别是像电

动工具等要求高出力的电机，浸渍漆的机械强度和粘结力是非常重要的性能。

（5）耐潮湿性好。漆膜吸潮会引起电气性能显著下降，因此浸渍漆必须具有小的透湿率，高的浸水后的电气特性。

（6）耐热性好。电机电器要缩小体积，减轻重量，提高出力和可靠性，就要减薄绝缘厚度，提高漆的耐热性。绝缘处理用漆的耐热性对电机电器的使用寿命有很大的影响。

（7）耐油、耐化学药品性好。对于油浸绝缘电器、冷冻机、化工厂等用电机电器的绝缘必须具有良好的耐油、耐冷媒、耐特殊化学药品蒸汽等性能。总之，不同电气设备的使用环境不同，所要求的耐环境气氛的内容也不一样。

绝缘胶是电气绝缘用无溶剂可聚合液体树脂体系的简称，是以液体（或可流动的糊状物）的形态施用于电气部件上，经适当方法固化后，形成电气部件的绝缘层，并用于电气、机械和环境的保护。这类材料可由一种或几种化学活性成分构成，其组成中可以含有较多的填料，也可以不含有填料。它们在使用前的状态可以是液体也可以是半固体或固体，但在使用时必须是具有较好流动性的液体或糊状物，在加热或室温下固化成坚实的固体绝缘物。

绝缘胶可分为浇注胶、浸渍胶、涂敷胶、粘合胶等类别。按使用前的状态，还可分为液体胶和热熔胶（固体胶）。采用浇入或灌注的方法，将绝缘胶用来铸型、填充或密封、包封电气部件，由于材料配制和应用工艺有其特点，所构成的绝缘有其特色，正在作为一大类绝缘材料得到越来越广泛的应用。

绝缘用熔敷粉末是一种可用适当方法直接涂敷于金属表面上且能加热熔化形成比较平滑绝缘涂层的粉末状树脂材料。它属于无溶剂可聚合的固体树脂体系。熔敷粉末也称粉末涂料，分热塑性和热固性两大类。热塑性粉末多用于电气装置或元件的保护涂层及耐热要求不高的场合下的绝缘；热固性粉末多用作电气设备的绝缘，其中以环氧熔敷粉末用得最多。环氧粉末将从低温快速固化、耐燃和耐户外气候等三方面进行改性或发展新型环氧树脂、固化剂和其他助剂，并扩大电绝缘用其他熔敷粉末品种，特别是耐高温、超薄层和特殊用途的材料。

1 有溶剂漆

1.1 醇酸浸渍漆

以醇酸树脂为主要漆基成分的一类浸渍漆统称醇酸树脂漆。

在有溶剂浸渍漆中，醇酸漆用量较大。这是因为这类漆原料来源丰富，漆的性能可在很广的范围内调节，价格低，储存稳定，浸渍性好。

醇酸树脂是由饱和多元醇、饱和多元酸和其他单元酸通过酯化作用缩合而成的一类树脂。变动原材料（或单体）种类和比例可制得很多品种，如利用多种合成树脂或改变多元醇的种类与用量，可制成漆的品种就非常之多。用做浸渍漆的主要是邻苯二甲酸系的含油醇酸及其改性漆，特别是酚醛醇酸、三聚氰胺醇酸使用最多。间苯二甲酸系醇酸漆近年也已大量采用，而随着绝缘材料工业的发展，用合成脂肪酸代替植物油和无油醇酸的应用必将越来越多，间苯二甲酸系等耐热醇酸漆的用量也必将越来越多。

这类醇酸浸渍漆是由脂肪酸、多元醇和多元酸通过酯化反应合成的树脂，溶于有机溶剂而成，如干性油醇酸树脂、不干性油醇酸树脂、短油度醇酸树脂、中油度醇酸树脂、长油度醇酸树脂等都属于这一类。醇酸树脂作为一种成分可与其他树脂或其他固化材料共缩聚，如与多异氰酸酯混合制成聚氨酯漆、与氨基树脂混合制成醇酸—氨基树脂漆。

主要品种有1032三聚氰胺醇酸浸渍漆、1032—K氨基醇酸快固化浸渍漆、1038A氨基醇酸低温快固化浸渍漆。

1.1.1 物理性能

几种主要醇酸浸渍漆的物理性能列于表1.2-3。

表1.2-3 几种主要醇酸浸渍漆的物理性能

指标名称	单位	指标值		
		1032	1032—K	1038A
外观	—	漆应溶解均匀，不应浑浊，不应有机械杂质，干后漆膜应光滑	漆液溶解均匀，无机械杂质，干后漆膜光滑	漆应溶解均匀，无机械杂质，干后漆膜光滑
固体含量（105℃±2℃，2h）	%	50±2	49±2	40±3
黏度（4号黏度计，23℃±2℃）	s	40±8	35±10	30～70
酸值	mgKOH/g	≤10	—	≤10
漆在敞口容器中的稳定性	—	黏度的增长不超过起始值的4倍	黏度的增长不超过起始值的4倍	黏度的增长不超过起始值的4倍

1.1.2 干燥性能

几种主要醇酸浸渍漆的干燥性能列于表1.2-4。

表1.2-4 几种主要醇酸浸渍漆的干燥性能

指标名称	指标值		
	1032	1032—K	1038A
漆膜干燥时间	105℃±2℃，干燥时间不大于2h不粘	105℃±2℃，干燥时间不大于1h	105℃±2℃，干燥时间不大于45min
厚层固化能力	不次于S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀	不次于S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀（10℃/20min的速度升温，80℃保温2h，升温至100～110℃保温2h，再升温至120℃保温6h）	不次于S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀（80℃/1h+100～110℃/2h+120℃/6h）

1.1.3 电气性能

几种主要醇酸浸渍漆的电气性能列于表1.2-5。

表1.2-5 几种主要醇酸浸渍漆的电气性能

指标名称		单位	指标值		
			1032	1032—K	1038A
工频电气强度	23℃±2℃	MV/m	≥70	≥80	≥80
	130℃±2℃		≥30	≥40	≥40
	23℃±2℃，浸水24h后		≥60	≥60	≥60

续表

指标名称		单位	指标值		
			1032	1032—K	1038A
体积电阻率	23℃±2℃	Ω·m	≥1.0×10^{12}	≥1.0×10^{12}	≥1.0×10^{12}
	130℃±2℃		≥1.0×10^{7}	≥1.0×10^{7}	≥1.0×10^{7}
	23℃±2℃，浸水7d后		≥1.0×10^{8}	≥1.0×10^{8}	≥1.0×10^{8}

1.1.4 热性能

几种主要醇酸浸渍漆的热性能列于表1.2-6。

表1.2-6 几种主要醇酸浸渍漆的热性能

指标名称	单位	指标值		
		1032	1032—K	1038A
热弹性（芯轴直径3mm试验，150℃±2℃）	30h	不开裂	不开裂	不开裂
温度指数 T_1	—	≥130	≥130	≥130

1.1.5 化学性能

几种主要醇酸浸渍漆的化学性能列于表1.2-7。

表1.2-7 几种主要醇酸浸渍漆的化学性能

指标名称	指标值		
	1032	1032—K	1038A
漆对漆包线的作用（铅笔硬度）	≥1H	≥1H	≥1H
耐溶剂蒸汽性（苯、丙酮、甲醇、己烷、二硫化碳任意通过二种）	附着力不改变，不剥落，不起泡，不滴流，不发粘（允许轻度发粘）	附着力不改变，不剥落，不起泡，不滴流，不发粘（允许轻度发粘）	附着力无改变，不剥落，不起泡，不流胶，不发粘（或稍有发粘）

1.1.6 产品特点

在有溶剂浸渍漆中，醇酸漆的用量较大，原材料来源丰富，漆的性能可在很广的范围内调节，价格低，储存稳定，浸渍性好。

1032具有良好的干透性、热弹性、耐油性和较高的介电性能。

1032—K与同类产品比具有突出的低温干燥性，能快速固化。与1032任意混溶，是1032理想的替代产品。

1038A该漆具有良好的热弹性、耐油性、介电性能和储存稳定性，尤其具有较为突出的低温快固化性能。

1.1.7 适用范围和应用技术

醇酸漆主要用来对电机、电器、线圈进行绝缘浸渍处理，以填充线圈、线槽或其他被绝缘物的空隙和气孔，将线圈导线绝缘粘结为绝缘整体，并在其表面形成连续的绝缘涂层，以提高整体绝缘结构的电气力学性能、导热性能及对环境的防护性能（如防潮、防化学腐蚀等），应用技术条件如下：

1032浸烘电机的一般工序如下：

预烘90～120℃→浸漆→滴漆→升温固化（10℃/20min）→90℃保温1h（10℃/20min）→110℃保温1h（10℃/20min）→120℃保温18～20h

电机及电器线圈一般浸烘两遍，根据工件大小的情况，各于120℃烘培时间为18～20h。必要时可将两遍浸渍的漆分置，使第一遍浸渍的漆黏度略低于第二遍的。

1032产品的固化时间较长，目前较多采用的是快干型的氨基醇酸树脂漆如1032—K。其各项性能与1032相当，能与1032产品混溶，但固化速度要快得多，1032—K浸烘电机的一般工序如下：

预烘100～120℃→浸漆→滴漆→升温固化（10℃/20min）→90℃保温1h（10℃/20min）→100℃保温1h（10℃/20min）→110～120℃保温2～6h

1038A：根据工件大小的不同，一般烘焙温度为100～120℃、2～6h。

1.2 聚酯浸渍漆

聚酯树脂是合成树脂的一个大类，由多元酸与多元醇缩聚而成。前面所述的醇酸树脂也是一种聚酯树脂，只是由于习惯，在实际使用中常将它与线型聚酯（如对苯二甲酸乙二醇酯）、不饱和聚酯分成不同的类别。

有溶剂浸渍漆的主要成分是对苯二甲酸系聚酯。它是在对苯二甲酸乙二醇线型聚酯，即聚酯薄膜所用树脂的基础上派生发展起来的。由于有的品种中使用了三元醇和干性油，所制得的是一种体型聚酯，实际上应归属于醇酸树脂类，正如由间苯二甲酸、多元醇、一元酸制得的树脂称为间苯二甲酸系醇酸一样，由对苯二甲酸、多元醇（如甘油）干性油制得的树脂也可称对苯二甲酸系醇酸树脂。

其代表性品种为1040改性聚酯低温快固化浸渍漆，该漆由耐热化合物改性聚酯树脂溶于二甲苯—丁醇等混合溶剂而成的有溶剂浸渍漆。

1.2.1 物理性能

1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的物理性能列于表1.2-8。

表1.2-8 1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的物理性能

指标名称	单位	指标值
外观	—	漆液均匀透明液体、无机械杂质、干后漆膜光滑
黏度（4号黏度计，23℃±1℃）	s	35±10
固体含量（120℃±2℃，1h，1.5～2g样）	%	46±2
漆在敞口容器中的稳定性	—	黏度增长不超过起始值的4倍

1.2.2 干燥性能

1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的干燥性能列于表1.2-9。

表1.2-9 1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的干燥性能

指标名称	指标值
厚层固化能力	不次于 S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀

1.2.3 电气性能

1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的电气性能列于表1.2-10。

表1.2-10 1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的电气性能

指标名称		单位	指标值
体积电阻率	常态	Ω·m	≥1.0×10^{11}
	23℃±2℃，浸水7天后		≥1.0×10^{8}

续表

指标名称		单位	指标值
介电强度	常态	MV/m	≥70
	155℃±2℃		≥30
	23℃±2℃，浸水24h后		≥60

1.2.4 热性能

1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的热性能列于表1.2-11。

表1.2-11 1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的热性能

指标名称	指标值
弹性（芯轴直径3mm）	不开裂
温度指数	≥155

1.2.5 化学性能

1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的化学性能列于表1.2-12。

表1.2-12 1040改性聚酯低温快固化浸渍漆的化学性能

指标名称	指标值
漆对漆包线的作用（铅笔硬度）	≥1H
耐溶剂蒸汽性（苯、丙酮、甲醇、己烷、二硫化碳，任意通过两种）	粘附力无变化，不起泡，不流挂，不发粘（允许轻微发粘）

1.2.6 产品特点

具有较好的低温干燥性，烘焙温度低，比现有同类F级漆低30℃左右，烘焙时间短，可比1032缩短一半，比同类F级漆缩短三分之一。可以作B、F级通用。

1.2.7 适用范围和应用技术

适用于Y2系列电机及其他F级电机线圈的浸渍处理。

浸烘电机的一般工序如下：

预烘90～120℃→浸漆→滴漆→升温固化（10℃/20min）→90℃保温1h（10℃/20min）→110℃保温1h（10℃/20min）→120～130℃保温2～5h

电机及电器线圈一般浸烘两遍。

1.3 环氧亚胺浸渍漆

1041—1环氧亚胺浸渍漆是环氧树脂和亚胺化合物反应溶于甲苯中组成的有溶剂浸渍漆。

1.3.1 物理性能

1041—1环氧亚胺浸渍漆的物理性能列于表1.2-13。

表1.2-13 1041—1环氧亚胺浸渍漆的物理性能

指标名称	单位	指标值
外观	—	漆液均匀，不应乳浊，干后漆膜光滑
黏度（4号黏度计，23℃±1℃）	s	16±4
固体含量（130℃±1℃，1h）	%	45±2
闪点	℃	记录
漆在敞口容器中的稳定性	—	黏度增长不超过起始值的4倍

1.3.2 干燥性能

1041—1环氧亚胺浸渍漆的干燥性能列于表1.2-14。

表1.2-14 1041—1环氧亚胺浸渍漆的干燥性能

指标名称	单位	指标值
漆膜干燥时间（135℃±2℃）	min	≤90
厚层固化能力（130℃±2℃，5h）	—	不次于S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀

1.3.3 电气性能

1041—1环氧亚胺浸渍漆的电气性能列于表1.2-15。

表1.2-15 1041—1环氧亚胺浸渍漆的电气性能

指标名称		单位	指标值
体积电阻率	常态	MΩ·m	$\geq 1.0\times10^{12}$
	155℃±2℃		$\geq 1.0\times10^{8}$
	浸水7d后		$\geq 1.0\times10^{8}$
介电强度	常态	MV/m	≥70
	155℃±2℃		≥40
	浸水24h后		≥60

1.3.4 粘结性能

1041—1环氧亚胺浸渍漆的粘结性能列于表1.2-16。

表1.2-16 1041—1环氧亚胺浸渍漆的粘结性能

指标名称		单位	指标值
粘结强度	常态	N	≥80
	155℃±2℃		≥8

1.3.5 热性能

1041—1环氧亚胺浸渍漆的热性能列于表1.2-17。

表1.2-17 1041—1环氧亚胺浸渍漆的热性能

指标名称	单位	指标值
温度指数	—	≥155

1.3.6 化学性能

1041—1环氧亚胺浸渍漆的化学性能列于表1.2-18。

表1.2-18 1041—1环氧亚胺浸渍漆的化学性能

指标名称	指标值
漆对漆包线的作用（铅笔硬度）	≥1H
耐溶剂蒸汽性（苯、丙酮、甲醇、己烷、二硫化碳，23℃±2℃，暴露7d后至少通过两种）	附着情况无变化，不剥落，不起泡，不流粘，不发粘（允许轻微发粘）

1.3.7 产品特点

环氧亚胺浸渍漆的特点是高温下介质损耗因数低以及低温快速固化，同时还具有室温下储存期长、性能稳定和防潮性能好的特点。

1.3.8 适用范围和应用技术

适用于F级电机、电器（包括高压电机）线圈的绝缘浸渍处理。

D005亚胺环氧浸渍漆应用参考工艺要点是采用阶梯升温，烘焙时用2h由65℃升到130℃，然后在130℃下保温8～12h，或150℃保温4～8h。

电机、电器线圈浸烘两次，根据工件的大小及结构确定应用工艺参数。应用过程中随着溶剂的挥发漆液黏度会增大，应适当添加新漆或稀释剂，保证合适的浸漆黏度。

1.4 聚酯亚胺浸渍漆

9116 聚酯亚胺浸渍漆是我国从西德贝克公司（Beck）引进的一种 H 级有溶剂浸渍漆。贝克公司型号为 Elmotherm H71。9116 聚酯亚胺浸渍漆由聚酯改性亚胺树脂、108 溶剂组成。用户少量稀释时可用二甲苯，大量稀释时应购买专用 108 溶剂。

1.4.1 物理性能

9116 聚酯亚胺浸渍漆物理性能列于表 1.2-19。

表 1.2-19 9116 聚酯亚胺浸渍漆物理性能

指标名称	单位	指标值
外观	—	漆液为深棕色透明液，无机械杂质，漆膜平整
黏度（4 号黏度计，23℃±1℃）	s	71
固体含量	%	48.15
厚层固化性	—	$I_{4.2}$、S_1、U_1、W_2（再软化 190℃，1h）

1.4.2 介电性能

9116 聚酯亚胺浸渍漆介电性能列于表 1.2-20。

表 1.2-20 9116 聚酯亚胺浸渍漆介电性能

指标名称	单位	指标值
电气强度（180℃±2℃）	MV/m	56
介质损耗因数（180℃±2℃）	%	12.6
体积电阻率（180℃±2℃）	Ω·m	1.0×10^7

1.4.3 耐化学性能

9116 聚酯亚胺浸渍漆耐化学性能列于表 1.2-21。

表 1.2-21 9116 聚酯亚胺浸渍漆耐化学性能

指标名称	单位	指标值	
耐变压器油性（105℃±2℃，7 天）	—	漆膜、油均不变色	
耐液体化学药品性 7 天后，电气强度下降	%	105℃变压器油 7 天	12
		5%氨水 7 天	39
		5%洗涤液 7 天	37.7

1.4.4 产品特点

该漆具有优异的力学、耐水、耐油、耐氟和耐化学药品性能，特别是具有低温快干和厚层不起泡的特性。

1.4.5 适用范围和应用技术

该漆可用于普通浸渍，滚浸和真空压力浸渍，尤其适用于防爆、化工、船用、冷冻电机以及各种 H 级大型电机变压器的浸渍，也适用于浸渍玻璃丝包粗线。

1.5 聚酰亚胺浸渍漆

聚酰亚胺浸渍漆是一类具有突出耐热性的浸渍漆，主要是由酸酐与二元胺经缩聚反应制得。

1.5.1 物理性能

聚酰亚胺浸渍漆的物理性能列于表 1.2-22。

表 1.2-22 聚酰亚胺浸渍漆的物理性能

指标名称	单位	指标值
外观	—	红棕色均匀透明液体，无机械杂质

续表

指标名称	单位	指标值
黏度（4 号黏度计，23℃±2℃）	s	14～40
固体含量（160℃±2℃，1h）	%	40±2
厚层固化能力	—	不次于 S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀
漆在敞口容器中的稳定性	—	黏度增长不超过起始值的 4 倍

1.5.2 干燥性能

聚酰亚胺浸渍漆的干燥性能列于表 1.2-23。

表 1.2-23 聚酰亚胺浸渍漆的干燥性能

指标名称	指标值
厚层固化能力	不次于 S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀

1.5.3 电气性能

聚酰亚胺浸渍漆的电气性能列于表 1.2-24。

表 1.2-24 聚酰亚胺浸渍漆的电气性能

指标名称		单位	指标值
体积电阻率	常态	Ω·m	$\geqslant1.0\times10^{12}$
	浸水 7 天后		$\geqslant1.0\times10^8$
介电强度	常态	MV/m	≥70
	180℃±2℃		≥40
	浸水 24h 后		≥60

1.5.4 机械性能

聚酰亚胺浸渍漆的力学性能列于表 1.2-25。

表 1.2-25 聚酰亚胺浸渍漆的力学性能

指标名称		单位	指标值
力学性能	常态	N	≥100
	180℃±2℃		≥10

1.5.5 热性能

聚酰亚胺浸渍漆的热性能列于表 1.2-26。

表 1.2-26 聚酰亚胺浸渍漆的热性能

指标名称	指标值
温度指数	≥180

1.5.6 化学性能

聚酰亚胺浸渍漆的化学性能列于表 1.2-27。

表 1.2-27 聚酰亚胺浸渍漆的化学性能

指标名称	指标值
漆对漆包线的作用（铅笔硬度）	≥1H
耐溶剂蒸汽性（苯、丙酮、甲醇、己烷、二硫化碳，23℃±2℃，暴露 7 天后，至少两种通过）	附着情况无变化，不剥落，不起泡，不流粘，不发粘（允许轻微发粘）

1.5.7 产品特点

聚酰亚胺浸渍漆的漆层在高温下不软化，并有很高的粘结强度，其粘结强度在 200℃只损失 5%。其突出特点是具有优异的耐热性能，有较好的工艺性和储存稳定性。

1.5.8 适用范围和应用技术

聚酰亚胺浸渍漆用于普通电机、电气绕组浸渍漆，也可用于牵引电机、氟里昂冷冻电机以及特种电机电器线圈的浸渍，以及雷达仪器等的绝缘处理。

D006改性聚酰亚胺浸渍漆应用参考工艺要点是采用阶梯升温，烘焙时用2h由65℃升到130℃，然后在130℃保温1h，阶梯升温到150～160℃下2～3h，继续升温至160～180℃，烘焙固化9～16h。

电机、电气线圈浸烘两次，应根据工件的大小及结构确定应用工艺参数。应用过程中随着溶剂的挥发漆液黏度会增大，应适当添加新漆或稀释剂，保证合适的浸漆黏度。

1.6 聚酰亚胺耐电晕漆包线漆

聚酰亚胺耐电晕漆包线漆是在GY220级聚酰亚胺漆包线漆基础上，通过添加无机纳米颗粒而开发成功的一种耐电晕漆包线漆。该漆分散稳定性好，耐热等级达到220℃以上，耐电晕性能优良，与铜线和聚酯、聚酰胺酰亚胺等漆层有良好的相容性和粘结性，适用于制作高耐热等级变频电机漆包线的耐电晕层。

该产品的黏度、固含量和耐电晕等级可根据用户的要求进行调整，常用的型号和规格见表1.2-28。

表1.2-28 220级聚酰亚胺耐电晕漆包线漆常用的型号和规格

型 号	规 格
GY220—14	最小固体含量为14%
GY220—16	最小固体含量为16%
GY220—18	最小固体含量为18%

以均苯四甲酸二酐和4，4'— 二胺基二苯醚为原料，在极性溶剂N，N' 二甲基乙酰胺中合成得聚酰胺酸溶液。然后采用超声波、强力机械搅拌等手段，将无机纳米粒子分散到聚酰胺酸溶液中制成。

1.6.1 力学性能

聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的力学性能列于表1.2-29。

表1.2-29 聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的力学性能

指标名称	单 位	试验值
拉伸强度	MPa	117
断裂伸长率	%	43

1.6.2 介电性能

聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的介电性能列于表1.2-30。

表1.2-30 聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的介电性能

指标名称	单 位	试验值
软化击穿	℃	560
热冲击（3D，30S）	℃	260

1.6.3 耐化学性能

聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的耐化学性能列于表1.2-31。

表1.2-31 聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的耐化学性能

指 标 名 称	单 位	试 验 值
耐油性（168h，150℃）	—	好
耐F22实验（72h，40℃）	—	—
发泡实验	—	好
往复刮漆	次	>80
萃取实验	%	<0.2

1.6.4 热性能

聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的热性能列于表1.2-32。

表1.2-32 聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的热性能

指标名称	单 位	试验值
耐热等级	—	240
应用范围	mm	ϕ1.2～6.0(模具)
比热容	J/(g·℃)	1～13
导热系数	kJ/(m·h·℃)	1.0～1.2
热膨胀系数	$℃^{-1}$	5
收缩率	%	0.2

1.6.5 产品特点

该漆耐热等级高且可用于非常大的线径范围，适用于不同规格的圆线，在20℃以下储存，具有非常好的稳定性。其耐高频脉冲特性比同类漆包线和相同热等级的一般漆包线要好得多。该漆的耐燃性和耐温性都很高，见表1.2-33。

表1.2-33 聚酰亚胺耐电晕漆包线漆的耐燃性和耐温性

指标名称	单 位	试验值
氧指数	%	43
流动温度	℃	>380
热变形温度	℃	360

1.6.6 适用范围和应用技术

除了前述用途外，还可用于对耐老化要求苛刻的工作环境中。如在变频电机的耐电晕漆包线中作屏蔽层，可大幅度延长电机的使用寿命，该材料也可用于航天领域耐辐射导线的防老化层。

1.7 变频电机用耐电晕漆包线漆

耐电晕漆包线漆采用数种纳米材料与专用的绝缘基体树脂复合，复合物显示出一种特殊的纳米效应，导热性好，电荷分散能力强，使高频脉冲电压下的局部放电、空间电荷、介质发热等问题大大缓解，具有卓越的耐电晕性能，特别适用于变频电机的漆包线绝缘，可大大延长变频电机的使用寿命。

1.7.1 物理性能

耐电晕漆包线漆的物理性能列于表1.2-34。

表1.2-34 耐电晕漆包线漆的物理性能

指标名称		单 位	指 标 值
外观	漆样	—	微浑均匀液体，无机械杂质
	线样		光滑、均匀，无影响性能的缺陷
固体含量（%）		%	≥35
黏度（20℃）		MPa·s	500～1000
漆膜连续性（30m）		个	针孔少于5个

1.7.2 电气性能

耐电晕漆包线漆的电气性能列于表1.2-35。

表1.2-35 耐电晕漆包线漆的电气性能

指标名称	单 位	指标值
软化击穿（320℃）	min	>2
击穿电压（常态）	kV	>5.0
耐电晕寿命	min	≥30

1.7.3 力学性能

耐电晕漆包线漆的力学性能列于表1.2-36。

表1.2-36 耐电晕漆包线漆的力学性能

指标名称	单 位	指标值
圆棒卷绕	—	1天不开裂
单向刮漆（平均/最小）	N	11.1/9.6

1.7.4 热性能

耐电晕漆包线漆的热性能列于表1.2-37。

表1.2-37 耐电晕漆包线漆的热性能

指标名称	指 标 值
热冲（220℃，30min）	2D

1.7.5 产品特点

耐电晕漆包线漆所涂制的三层复合漆包线具有优异的耐电晕性能。据检测机构测试，在相同的试验条件下，我国耐电晕漆包线漆的耐电晕寿命与美国Phelps Dodge公司的同类产品相当。

在400ns、3000V、20kHz、50%、90℃的测试条件下，本产品耐电晕寿命为230h，国外公司的耐电晕寿命为200h。

采用美国DEI公司的DTS—1750A测试（25ns、3500V、20kHz、50%、130℃），本产品耐电晕寿命为40～60min，国外公司的耐电晕寿命为30～40min。

耐电晕漆包线采用三层复合结构，在普通PEI/PAI复合涂层的中间加涂一层特制的耐电晕漆，该漆与底漆、面漆的相容性好，并可在同一工艺条件下固化成膜，工艺性能好。

1.7.6 适用范围和应用技术

耐电晕漆包线漆既可作为三层复合漆包线的中间层漆，也可作为双层复合漆包线的面漆；耐电晕漆包线漆可以采用通用的涂线设备和工艺制造耐电晕漆包线，既可采用模具法涂线，也可采用毛毡法涂线，工艺适应性强，使用方便。

1.8 聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆

随着交流变频调速技术的应用，大、中功率牵引电机绝缘系统受到电晕腐蚀而过早失效的问题日益突出。原有适于工频下使用的性能优异的聚酰胺酰亚胺材料，已经不能满足变频电机绝缘的运行要求。国内在已有的系列GY1760聚酰胺酰亚胺漆包线漆基础上，通过引入纳米颗粒，成功开发出系列化GY1760聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆。其种类和规格见表1.2-38。

表1.2-38 200级聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的种类和规格

型 号	规 格
GY1760—16	最小固体含量为16%
GY1760—25	最小固体含量为25%
GY1760—30	最小固体含量为30%
GY1760—35	最小固体含量为35%

PAI绝缘漆，加入纳米颗粒Al_2O_3、TiO_2、SiO_2等，然后采用超声波、强力机械搅拌等手段，将无机纳米粒子分散到聚酰胺酸溶液中制成。

1.8.1 力学性能

聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的力学性能列于表1.2-39。

表1.2-39 聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的力学性能

序 号	指标名称	单 位	试验值
1	拉伸强度	MPa	55
2	断裂伸长率	%	4

1.8.2 介电性能

聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的介电性能列于表1.2-40。

表1.2-40 聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的介电性能

指标名称	单 位	试 验 值
电气强度	MV/m	>110
体积电阻率	Ω·m	$>2\times10^{12}$
介电常数（60Hz）	—	4.0～4.5
介质损耗因数（60Hz）	—	0.012～0.016

1.8.3 耐化学性能

聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的耐化学性能列于表1.2-41。

表1.2-41 聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的耐化学性能

指 标 名 称	单 位	试验值
耐油性（168h，150℃）	—	好
耐F22实验（72h，40℃）	—	好
发泡实验	—	好
往复刮漆	次	>80
萃取实验	%	<0.2

1.8.4 热性能

聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的热性能列于表1.2-42。

表1.2-42 聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆的热性能

指标名称	单 位	试 验 值
耐热等级	℃	220
软化击穿	℃	390
热冲击（3D，3S）	—	—
单一涂层	℃	240
底漆PEI	℃	240

1.8.5 产品特点

外层用聚酰胺酰亚胺漆具有高耐热性、优良的耐磨性、热冲击性、耐热老化性能，并具有优异的耐溶剂性能和耐F22性能。

1.8.6 适用范围和应用技术

主要用做变频电机复合耐电晕漆包线。

1.9 硅钢片漆

用硅钢片漆涂覆硅钢片，可降低铁心的涡流损耗，增加防锈和耐腐蚀能力。硅钢片漆在高温烘焙后，具有附着力强、坚硬、光滑、厚度均匀的优点，还具有良好的耐潮性、耐油性，电气性能好等特点。

随着电机单机容量的不断提高，对大型电机定子铁心的绝缘要求越来越高。国外大型公司如德国西门子公司、加拿大GE公司、日本日立公司等都在电机定子铁心中采用无机或半无机绝缘，而国内硅钢片绝缘仍采用有机涂层，漆膜厚度大、铁心叠压系数低，边缘增厚严重。Franklin烧损试验泄露电流大，进口半无机硅钢片漆不仅价格昂贵，也不利于

我国大电机的发展。

为使我国硅钢片漆达到或超过国外先进水平，国内进行了大量的开发工作，取得了一定的成果，先后开发出了133C环氧聚酯酚醛半无机硅钢片漆、133A环氧聚酯酚醛硅钢片漆、D062改性酚醛聚酯水溶性硅钢片漆、D063环氧聚酯酚醛硅钢片漆等产品，并在国家重点工程中获得了应用，如133C环氧聚酯酚醛半无机硅钢片漆已应用于三峡机组定子铁心绝缘，社会效益和经济效益显著。1995年133A环氧聚酯酚醛硅钢片漆正式用于东方电机股份有限公司与日立合作生产的600MV汽轮发电机铁心冲片的涂漆，证实该漆性能优异，到目前为止，133A硅钢片漆已在哈尔滨电机厂、东方电机厂、东风电机厂等厂家大量应用于大型电机定子铁心硅钢片表面绝缘。

硅钢片漆适用于F级电机、电器的硅钢片片间绝缘。其主要成分如下：

(1) 133C环氧聚酯酚醛半无机硅钢片漆是由环氧树脂、耐热聚酯树脂、酚醛树脂、半无机填料复合后溶于有机溶剂中制成。

(2) 133A环氧聚酯酚醛硅钢片漆是由环氧树脂、耐热聚酯、酚醛树脂复合后溶于有机溶剂中制成。

(3) D062改性酚醛聚酯水溶性硅钢片漆是采用酚醛树脂、聚酯树脂经反应溶于水中制成。

(4) D063环氧聚酯酚醛硅钢片漆是采用环氧、酚醛树脂和聚酯树脂等加入适量有机溶剂混合而成。

1.9.1 物理性能

硅钢片漆的物理性能列于表1.2-43。

表1.2-43 硅钢片漆的物理性能

指标名称	单位	指标值			
		D062	D063	133C	133A
外观	—	均匀透明液体，无机械杂质	溶解均匀，无机械杂质，干后漆膜光滑，无气泡	无外来杂质，搅匀后无可见固体颗粒或粉块	均匀透明液体，无杂质
黏度（4号黏度计，25℃±1℃）	s	20～60	18～25	18～25	18～25
固体含量（140℃±2℃，2h）	%	50±3	≥28	≥31（105℃±2℃，2h）	28（105℃±2℃，2h）
硅含量	%	—	—	5±1	

1.9.2 干燥性能

硅钢片漆的干燥性能列于表1.2-44。

表1.2-44 硅钢片漆的干燥性能

指标名称	单位	指标值			
		D062	D063	133C	133A
干燥时间	min	≤12/210℃±5℃	≤40/180℃±2℃	≤40/180℃±2℃	≤40/180℃±2℃

1.9.3 电气性能

硅钢片漆的电气性能列于表1.2-45。

表1.2-45 硅钢片漆的电气性能

指标名称	单位	指标值			
		D062	D063	133C	133A
体积电阻率（常态）	Ω·m	≥1.0×10^{11}	≥1.0×10^{12}	≥1.0×10^{12}	≥1.0×10^{12}
155℃±2℃			≥1.0×10^{9}	≥1.0×10^{9}	≥1.0×10^{9}
电气强度（常态）	MV/m	≥70	≥90	≥50	≥50

1.9.4 力学性能

硅钢片漆的力学性能列于表1.2-46。

表1.2-46 硅钢片漆的力学性能

指标名称	单位	指标值			
		D062	D063	133C	133A
附着力（划圈法）	—	一级	—	一级	一级

1.9.5 耐化学性和耐热性

硅钢片漆的耐化学性和耐热性列于表1.2-47。

表1.2-47 硅钢片漆的耐化学性和耐热性

指标名称	单位	指标值			
		D062	D063	133C	133A
耐油性	—	不起泡，无皱纹（105℃，变压器油中24h）	不起泡、不脱落（155℃，变压器油中24h）	不起泡，不脱落（120℃，变压器油24h）	不起泡，不脱落（120℃，变压器油24h）
温度指数	—	—	—	≥155	≥155

1.9.6 产品特点

D062具有优良的电绝缘性能及附着性、干燥速度快等优点，采用无毒醇类助溶剂及水作溶剂，既减少了环境污染，又改善了工作环境。

D063具有优良的电绝缘性能及良好的附着性，且干燥速度快。

133C涂片后性能要求见表1.2-48。

表1.2-48 133C涂片后的性能要求

指标名称	单位	指标值
弯曲测试 试样在ϕ38mm棒上弯曲	—	漆膜不开裂、不脱落
漆膜平均厚度	mm	0.012～0.017
Franklin烧损 150℃±5℃/3MPa/0.5V（DC）	mA	平均值≤20 最大值≤50
铁心叠压系数	%	94.5～98.5

133A环氧聚酯酚醛硅钢片漆在大型发电机定子铁心绝缘应用时具有储存稳定性、涂刷工艺性好、电绝缘性能高的特点，可于250～350℃快干，漆膜坚硬、耐油、耐水、附着力良好、介电性高，尤其是使硅钢片边缘增厚现象明显降低。

1.9.7 适用范围和应用技术

D062使用于F级电机、电器的硅钢片片间绝缘。根据工件大小和设备的不同，一般烘焙温度为250～400℃。可以用水作溶剂来稀释漆液。

D063适用于F级大型电机和高压电机中硅钢片间绝缘。

根据工件大小和设备的不同，一般烘焙温度为200～400℃。在使用D062和D063的过程中，要注意保持漆的黏度稳定，如有气泡发生，可用溶剂稀释了的少量硅油消泡。

133C环氧聚酯酚醛半无机硅钢片漆在大型发电机定子铁心绝缘应用时具有储存稳定性，涂刷工艺性好，电绝缘性能高的特点，尤其通过了Franklin烧损试验——其目的在于铁心过热时冲片间有足够的电阻以保证片间绝缘良好并可阻止片间短路的发生和扩大。

(1) 填料沉淀少。由于有机相的密度比无机填料密度小得多，两相混合后必产生沉淀，133C漆选择细度适中，经活性基团处理的填料，有效地解决了沉淀问题。

(2) 涂刷工艺性好。为了确保涂刷工艺性好，确定了填料在固体漆基中的含量为15%～20%，超过此范围电气强度下降明显，在此范围内既通过了Franklin烧损试验又满足了电气强度要求。

(3) 附着力强。东电公司采用日本日立公司硅钢片漆标准，要求硅钢片漆附着力在成品冲片上用划圈法试验达一级，经测试133C漆附着力达到一级。

(4) 储存稳定性好。133C漆进行了科学合理的配方设计，该漆在室温下密封储存半年，黏度基本无变化，经轻微摇动，色泽均匀，未见固体颗粒和粉块，储存稳定性良好。

133A环氧聚酯酚醛硅钢片漆在大型发电机定子铁心绝缘应用时具有储存稳定性、涂刷工艺性好、电绝缘性能高的特点，可于250～350℃快干，漆膜坚硬、耐油、耐水、附着力良好、介电性能高，尤其是使硅钢片边缘增厚现象明显降低。

133A环氧聚酯酚醛硅钢片漆用于大型电机定子铁心硅钢片表面绝缘时，涂刷时工艺性好，涂刷完后硅钢片表面色泽均匀，漆膜无气泡，断面覆盖情况良好并有效降低硅钢片边缘增厚现象。

1.10 漆包线漆与丝包线漆

1.10.1 聚酯漆包线漆

1730聚酯漆包线漆是由对苯二甲酸系列聚酯树脂溶于甲酚、二甲苯中制成的漆包线漆。

1.10.1.1 物理性能

聚酯漆包线漆的物理性能列于表1.2-49。

表1.2-49 聚酯漆包线漆的物理性能

指标名称		单位	指标值
外观	漆样	—	均匀透明液体，无机械杂质和不溶解粒子漆膜光滑
	线样		漆包线表面应光洁、色泽均匀、不应有影响漆包线性能的缺陷
尺寸	漆膜厚度	mm	应符合GB/T 6109.1第7条规定
	漆包线最大外径		应符合GB/T 6109.1第8条规定
固体含量200℃±3℃，1h		%	≥31或供需双方商定
黏度4号黏度计，30℃±1℃		s	在25～150范围内，可供需双方商定指标值
漆膜连续性		—	每30m漆包线长度内的缺陷应不超过5个

1.10.1.2 电气性能

聚酯漆包线漆的电气性能列于表1.2-50。

表1.2-50 聚酯漆包线漆的电气性能

指标名称		单位	指标值
软化击穿 240℃±3℃		min	≥2
击穿电压（室温）	0.25mm	V	5个漆包线试样至少有4个试样不低于3900
	1.1～25mm		5个漆包线试样至少有4个试样不低于5000

1.10.1.3 力学性能

聚酯漆包线漆的力学性能列于表1.2-51。

表1.2-51 聚酯漆包线漆的力学性能

指标名称			单位	指标值
圆棒卷绕（室温）			—	1天不裂
急拉断（0.25mm漆包铜圆线）			—	急拉断后漆膜应不开裂或不失去附着性
剥离扭绞（1.1～25mm漆包铜圆线）			次	扭转120次漆膜不失去附着性
单向刮漆	平均值	0.25mm	N	≥4.50
		1.1～25mm		≥11.1～90
	个别值	0.25mm		≥3.80
		1.1～25mm		≥10.00

1.10.1.4 热性能

聚酯漆包线漆的热性能列于表1.2-52。

表1.2-52 聚酯漆包线漆的热性能

指标名称		指标值
热冲击（155℃±3℃，30min）	0.25mm	4天不裂（一般情况3天不裂）
	1.1～25mm	7天不裂（一般情况4天不裂）
温度指数		≥130

1.10.1.5 耐化学性

聚酯漆包线漆的耐化学性列于表1.2-53。

表1.2-53 聚酯漆包线漆的耐化学性

指标名称		指标值
耐溶剂	200号汽油：二甲苯：正丁醇=6：3：1	1H不破

1.10.1.6 产品特点

该漆具有优良的绝缘性、耐热性、抗磨性和耐溶剂性。

1.10.1.7 适用范围和应用技术

适用于涂制高强度的B级漆包线。涂线道数为5～8次，毛毡法或模具法；炉温为350～500℃。

1.10.2 改性聚酯漆包线漆

DF251 F级改性聚酯漆包线漆是新一代特种漆包线漆，它是借鉴欧洲先进技术，选取有效的催化流平体系。

1.10.2.1 物理性能

改性聚酯漆包线漆的物理性能列于表1.2-54。

表1.2-54 改性聚酯漆包线漆的物理性能

指标名称		单位	指标值			
外观	漆样	—	漆液均匀透明，无机械杂质、颗粒			
	线样		表面应光洁，色泽均匀，无影响漆包线性能的缺陷			
固含量（180℃±3℃/1h，2g）		%	29±1	31±1	35±1	40±1

续表

指标名称		单位	指　标　值			
黏度	(30±1)℃	s	20～35	25～60	—	—
	(20±1)℃	10^{-3} Pa·s	—	—	500～800	600～1500
涂线方式		—	毛毡	毛毡	模具	模具
涂线尺寸		mm	0.1～0.8	0.4～5.0	0.4～3.0	1.1～5.0
漆膜连续性		—	每 30m 长漆膜缺陷小于 5			

注　毛毡涂线时，大黏度漆可用稀释剂调配后涂制细线，模具涂线可直接上线。

1.10.2.2　电气性能

改性聚酯漆包线漆的电气性能列于表 1.2-55。

表 1.2-55　改性聚酯漆包线漆的电气性能

指　标　名　称			单位	指标值	实测值
击穿电压	室温	0.80mm	V	≥4900	11 000
		1.1～250mm	V	≥5000	13 000
软化击穿（2min）			℃	≥240	≥300

1.10.2.3　力学性能

改性聚酯漆包线漆的力学性能列于表 1.2-56。

表 1.2-56　改性聚酯漆包线漆的力学性能

指标名称	单位	指标值	实测值
圆棒卷绕（室温下）	—	1 天不开裂露铜	合格
剥离扭绞（1.1～25mm 漆包圆铜线）	次	104 次漆膜不失去附着性	130

1.10.2.4　热性能

改性聚酯漆包线漆的热性能列于表 1.2-57。

表 1.2-57　改性聚酯漆包线漆的热性能

指标名称		指标值	实测值
热冲击（30min，175～180℃）	0.80mm	2 天不开裂露铜	1 天不开裂
	1.1～250mm	3 天不开裂露铜	1 天不开裂

1.10.2.5　产品特点

它具有优良的附着性；热冲击性能优异；电压稳定性良好；涂线工艺性好。

1.10.2.6　适用范围和应用技术

适用于进口快速机和国产机涂制 155 级改性聚酯漆包线，适合于模具和毛毡涂线。

1.10.3　聚氨酯漆包线漆

DF—3075 聚氨酯漆包线漆是由多元醇与异氰酸酯树脂的封闭物及助剂溶于有机溶剂中经反应而成，耐热等级为 B 级。

1.10.3.1　物理性能

聚氨酯漆包线漆的物理性能列于表 1.2-58。

表 1.2-58　聚氨酯漆包线漆的物理性能

指标名称		单位	指标值		
			DF-3075-27	DF-3075-38	DF-3075-45
外观	漆样	—	透明黏稠液体，无机械杂质		
	线样		表面应光滑，色泽均匀，不应有影响漆包线性能的缺陷		
尺寸	漆膜厚度	mm	≥0.032		
	导体标称直径		0.250		

续表

指标名称		单位	指标值		
			DF-3075-27	DF-3075-38	DF-3075-45
固含量		%	27.0±1.0	38.0±1.5	45.0±1.5
黏度（4 号黏度计，30℃±1℃）		s	19±4	32±5	40±8（6 号杯）
涂线方式		—	毛毡法	毛毡法或模具法	模具或毛毡法
涂线尺寸		mm	φ0.03～0.15	φ0.10～0.80	φ0.50～1.50
焊锡性（375℃±5℃）		s	≤3		
针孔	常态针孔数	个	0		
	拉伸 3% 后针孔数		0		

注　调漆时用专用稀释剂调配。

1.10.3.2　电气性能

聚氨酯漆包线漆的电气性能列于表 1.2-59。

表 1.2-59　聚氨酯漆包线漆的电气性能

指标名称	单　位	指　标　值
击穿电压（室温）	V	≥3900
软化击穿（170℃）	min	≥2

1.10.3.3　力学性能

聚氨酯漆包线漆的力学性能列于表 1.2-60。

表 1.2-60　聚氨酯漆包线漆的力学性能

指标名称		单位	指　标　值
圆棒卷绕（室温）		—	1 天不开裂露铜
急拉断		—	漆膜应不开裂露铜
耐刮性	平均刮破力	N	≥4.10
	最小值		≥3.50

1.10.3.4　热性能

聚氨酯漆包线漆的热性能列于表 1.2-61。

表 1.2-61　聚氨酯漆包线漆的热性能

指　标　名　称	指　标　值
热冲击（150℃±5℃，1h）	拉伸 10%不开裂露铜
温度指数	≥130

1.10.3.5　耐化学性

聚氨酯漆包线漆的耐化学性列于表 1.2-62。

表 1.2-62　聚氨酯漆包线漆的耐化学性

指标名称	单位	指　标　值
耐溶剂标准溶液中浸泡	h	2h 不起泡溶胀、不开裂露铜

1.10.3.6　产品特点

该产品直焊性好，能够在较低温度（360℃）下直焊；盐水针孔性能优异，常态、拉伸及 1 天弯折均无针孔；耐热性好，热老化击穿电压及热冲性能优异；漆包线的各项性能均达到或超过日本 JISC3202 标准要求；漆包线经长时间存放后其电压和盐水针孔均无明显变化。

1.10.3.7 适用范围和应用技术

适合于采用毛毡或模具法涂制 ϕ1.1～50mm 以下的各种 B 级 QA 和 QACC 线，其相应的工艺条件见表 1.2-63。

表 1.2-63 聚氨酯漆包线漆毛毡法或模具法涂制工艺条件

机型		日本久原卧机	国产卧机	西格马卧机	西格马卧机
涂线方式		毛毡法	毛毡法	毛毡法	模具法
线径（mm）		0.05	0.125	0.25	0.50
炉温（℃）	入口	330～360	340～360	350～380	360～390
	固化	380～420	380～450	420～480	400～540
车速（m/min）		240～320	130～260	100～180	80～120

1.10.4 聚酯亚胺漆包线漆

DF-127 H 级聚酯亚胺漆包线漆是新研制的特种漆包线漆。它是借鉴欧洲先进技术，选取有效的催化流平体系，适合于进口和国产漆包机涂制 180 级聚酯亚胺漆包线。

1.10.4.1 物理性能

聚酯亚胺漆包线漆的物理性能列于表 1.2-64。

表 1.2-64 聚酯亚胺漆包线漆的物理性能

指标名称		单位	指标值			
外观	漆样	—	漆液均匀透明，无机械杂质、颗粒			
	线样		表面应光洁，色泽均匀，无影响漆包线性能的缺陷			
固体含量（180℃±3℃/1h、2g）		%	30±1	32±1	36±1	41±1
黏度	30℃±1℃	s	20～38	30～80	—	—
	20℃±1℃	10^{-3} Pa·s	—	—	600～1000	800～1500
涂线方式			毛毡	毛毡或模具	模具	模具
涂线尺寸		mm	0.1～0.8	0.4～3.0	0.4～3.0	0.4～3.0
漆膜连续性		—	每 30m 长漆膜缺陷小于 5			

注 毛毡涂线时，大黏度漆可用稀释剂调配后涂制细线，模具涂线可直接上线。

1.10.4.2 电气性能

聚酯亚胺漆包线漆的电气性能列于表 1.2-65。

表 1.2-65 聚酯亚胺漆包线漆的电气性能

指标名称			单位	指标值
击穿电压	室温	0.250mm	V	≥4000
		1.1～250mm	V	≥5000
	180℃	1.1～250mm	V	≥4000
软化击穿（320℃）			min	≥2

1.10.4.3 力学性能

聚酯亚胺漆包线漆的力学性能列于表 1.2-66。

表 1.2-66 聚酯亚胺漆包线漆的力学性能

指标名称	单位	指标值
圆棒卷绕（室温）	—	1 天不开裂露铜
急拉断	—	漆膜应不开裂露铜
刮离扭绞（1.1～250mm）	次	88 次漆膜不失去附着性

续表

指标名称			单位	指标值
耐刮性	0.25mm	平均值	N	≥4.7
		最小值		≥4.0
	1.1～25mm	平均值		≥12.5
		最小值		≥10.5

1.10.4.4 热性能

聚酯亚胺漆包线漆的热性能列于表 1.2-67。

表 1.2-67 聚酯亚胺漆包线漆的热性能

指标名称		指标值
热冲击（30min 200℃±2℃）	0.25mm	4 天不开裂露铜
	1.1～25mm	3 天不开裂露铜
温度指数		≥180

1.10.4.5 耐化学性

聚酯亚胺漆包线漆的耐化学性列于表 1.2-68。

表 1.2-68 聚酯亚胺漆包线漆的耐化学性

指标名称	指标值
耐溶剂（标准溶液中浸泡后）	铅笔硬度≥1H

1.10.4.6 产品特点

产品具有优良的耐冷媒、耐热软化性能；热冲击性能优异；该产品配方合理，储存一段时间后，几乎没有电压降。

1.10.4.7 适用范围和应用技术

既可用于涂制 QZY 线，也可作为高耐热等级复合线的底层漆使用；涂线工艺性好，适用于进口快速机和国产机涂线，模具和毛毡涂线。

涂线工艺参考表 1.2-69 所示条件。

表 1.2-69 聚酯亚胺漆包线漆的涂线工艺

设备	MAG 立机	梅达立机（催化燃烧）
固体含量（%）	36	32
涂漆黏度（30℃）	原漆 450cP	稀释到 36s 左右
涂漆方式	模具 14 次	毛毡 7 次
炉温（℃）	600	230、280、320、420、510、440
铜线直径（mm）	1.1～829	1.1～250
漆膜厚度（mm）	0.089	0.078
车速（m/min）	50	12～18

1.10.5 聚酰胺酰亚胺漆包线漆

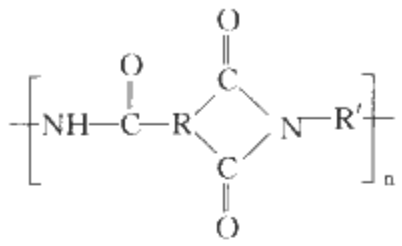
聚酰胺酰亚胺漆包线漆固体含量大，耐热等级高，储存稳定性较好，漆膜的力学性能、耐磨性和耐冷媒性优良，目前广泛用作 180℃和 200℃级漆包线的外涂层。通过自主开发，采用技术上比较先进的异氰酸酯路线，优化工艺和配方，国内成功完成系列化 GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的研制工作，并已批量生产，用户反映各项性能良好，尤其在储存稳定性和工艺性方面更优。

GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的种类和规格见表 1.2-70。

表 1.2-70 GY1760200 级聚酰胺酰亚胺漆包线漆的种类和规格

型号	规格
GY1760—16	最小固体含量为 16%
GY1760—25	最小固体含量为 25%
GY1760—30	最小固体含量为 30%
GY1760—35	最小固体含量为 35%

利用三元羧酸酐和二异氰酸酯在强极性溶剂中进行综合反应而成的。聚酰胺酰亚胺（PAI）分子中同时具有耐热的酰亚胺环和柔性的酰胺基团，因此具有优良的耐热性、介电性、力学性能和化学稳定性，其分子结构如下：



1.10.5.1 力学性能

GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的力学性能列于表 1.2-71。

表 1.2-71 GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的力学性能

指标名称	单 位	试验值
拉伸强度	MPa	95
断裂伸长率	%	12

1.10.5.2 介电性能（试验数据，仅供参考）

GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的介电性能列于表 1.2-72。

表 1.2-72 GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的介电性能

指标名称	单 位	试验值
电气强度	MV/m	>140
体积电阻率	Ω·m	$>1.1\times10^{13}$
介电常数（60Hz）	—	2.8～3.0
介质损耗因数（60Hz）	—	0.006～0.008

1.10.5.3 耐化学性能

GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的耐化学性能列于表 1.2-73。

表 1.2-73 GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的耐化学性能

指标名称	单 位	试 验 值
耐油性（168h，150℃）	—	好
耐 F22 实验（72h，40℃）	—	好
发泡实验	—	好
往复刮漆	次	>80
萃取实验	%	<0.2

1.10.5.4 热性能

GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的热性能列于表1.2-74。

表 1.2-74 GY1760 聚酰胺酰亚胺漆包线漆的热性能

指标名称	单 位	试验值
耐热等级	℃	220
软化击穿	℃	390
热冲击（3D，30s）	—	—
单一涂层	℃	240
底漆 PEI	℃	240

1.10.5.5 产品特点

外层用聚酰胺酰亚胺漆具有高耐热性、优良的耐磨性、热冲击性、耐热老化性能，并具有优异的耐溶剂性能和耐 F22 性能。

1.10.5.6 适用范围和应用技术

聚酰胺酰亚胺绝缘漆应用范围十分广泛。由于其优异的耐热性、介电性能、力学性能等，普通聚酰胺酰亚胺绝缘漆现阶段主要作为变频电机漆包线复合绝缘漆的面漆使用；同时也适用于冰箱、冷柜、空调压缩机电机，高温、高速、频繁起动的电机和密封式电机、电器的线圈等。模制塑料主要用于齿轮、辊子、轴承和复印机分离爪等。它具有良好的耐烧蚀性能和高温、高频下的电磁性，可作飞行器的烧蚀材料、透磁材料和结构材料。

该产品具有较大的线径适用范围：ϕ0.2～6.00mm（模具）扁线；ϕ0.05～0.40mm（毛毡）。

1.10.6 尼龙漆包线漆

DF—43 自润滑漆是由聚酰胺、润滑剂和助剂溶于有机溶剂中制成，也称为尼龙漆包线漆。

1.10.6.1 物理性能

DF—43 自润滑漆的物理性能列于表 1.2-75。

表 1.2-75 DF—43 自润滑漆的物理性能

指标名称	单 位	指 标 值	
		DF—43—15	DF—43—11
外观	—	红棕色粘稠液体，无机械杂质	
固体含量	%	15±1.5（1.5g 样，170℃±2℃，2h）	11±1.0（1.5g 样，180℃±2℃，1h）
黏度	10^{-1}Pa·s	22±6(30℃±0.5℃)	8±2(25℃±0.5℃)

1.10.6.2 产品特点

该产品固体含量高，稳定性好；所涂漆包线静摩擦系数低，具有优异的润滑性与耐磨性，能满足苛刻的绕线条件。

1.10.6.3 适用范围和应用技术

适用于涂制各种线规的 120～155 级自润滑漆包线。

1.10.7 醇酸玻璃丝包线漆

D072 醇酸玻璃丝包线漆是由干性植物油醇酸树脂，溶解于甲苯或二甲苯及 200 号汽油中而制成的黄至褐色烘干漆液。

1.10.7.1 物理性能

醇酸玻璃丝包线漆的物理性能列于表 1.2-76。

表 1.2-76 醇酸玻璃丝包线漆的物理性能

指 标 名 称	单 位	指 标 值
外 观	—	漆应溶解均匀，不应乳浊，不应含有机械杂质
黏度(6 号黏度计，25℃±2℃)	s	≥50 或按用户协议
固体含量(105℃±2℃，2h)	%	50±3
干燥时间(105℃±2℃)	h	≤3
酸 值	mgKOH/g	≤13

1.10.7.2 电气性能

醇酸玻璃丝包线漆的电气性能列于表 1.2-77。

表 1.2-77 醇酸玻璃丝包线漆的电气性能

指 标 名 称	单 位	指 标 值
介电强度(常态)	MV/m	≥40

1.10.7.3 力学性能

醇酸玻璃丝包线漆的力学性能列于表 1.2-78。

表 1.2-78 醇酸玻璃丝包线漆的力学性能

指标名称	单位	指标值
(热)弹性(150℃±2℃)	h	≥24

1.10.7.4 产品特点

D072 醇酸玻璃丝包线漆具有良好的热弹性。

1.10.7.5 适用范围和应用技术

适用于涂制 B 级玻璃丝绕包电磁线。固化温度一般在 250～350℃。

1.10.8 改性聚酯玻璃丝包线漆

D082 改性聚酯玻璃丝包线漆是由改性聚酯树脂溶解在有机溶剂中组成的 F 级玻璃丝包线漆。

1.10.8.1 物理性能

改性聚酯玻璃丝包线漆的物理性能列于表 1.2-79。

表 1.2-79 改性聚酯玻璃丝包线漆的物理性能

指标名称	单位	指标值
外观	—	漆应溶解均匀，不应乳浊，不应含有机械杂质
黏度(6 号黏度计，25℃±2℃)	s	≥30
固体含量(105℃±2℃，2h)	%	50±3
干燥时间(105℃±2℃)	h	≤1
酸值	mgKOH/g	≤13

1.10.8.2 电气性能

改性聚酯玻璃丝包线漆的电气性能列于表 1.2-80。

表 1.2-80 改性聚酯玻璃丝包线漆的电气性能

指标名称	单位	指标值
介电强度(常态)	MV/m	≥50

1.10.8.3 力学性能

改性聚酯玻璃丝包线漆的力学性能列于表 1.2-81。

表 1.2-81 改性聚酯玻璃丝包线漆的力学性能

指标名称	单位	指标值
弹性(150℃±2℃)	h	≥24

1.10.8.4 产品特点

具有较好的附着性、弹性和干燥性。

1.10.8.5 适用范围和应用技术

适用于涂制 F 级玻璃丝包线。

2 无溶剂漆

2.1 不饱和聚酯亚胺无溶剂滴浸树脂

不饱和聚酯亚胺无溶剂滴浸树脂是从西德贝克公司(Beck)引进的一种 F 级滴浸无溶剂树脂，贝克公司型号为 DobeckanFT1040。该树脂主要组成是亚胺改性不饱和聚酯树脂，活性溶剂是苯乙烯。为延长适用期，一般情况 K_2 固化剂单独包装供货。

2.1.1 物理性能

不饱和聚酯亚胺无溶剂滴浸树脂的物理性能列于表 1.2-82。

表 1.2-82 不饱和聚酯亚胺无溶剂滴浸树脂的物理性能

指标名称	单位	试验值
外观		棕黄色透明液，无机械杂质

续表

指标名称	单位	试验值
黏度(4 号黏度计，23℃±1℃)	s	32
胶凝时间(80℃±1℃)	s	2271
厚层固化性	—	S_1、U_1、$I_{2.2}$

2.1.2 介电性能

不饱和聚酯亚胺无溶剂滴浸树脂的介电性能列于表 1.2-83。

表 1.2-83 不饱和聚酯亚胺无溶剂滴浸树脂的介电性能

指标名称	单位	试验值
电气强度(常态)	MV/m	60

2.1.3 产品特点

该树脂具有优异的机电、耐水、耐溶剂、耐酸、耐油、耐热带气候等性能。该树脂固化温度低，时间短，120℃，定子 5～10min，转子 10～15min，即可完成全部固化过程，不需后处理。

2.1.4 适用范围和应用技术

该树脂适用于中心高 355 以下标准电动机，尤其适用于中小电动机、微电机、家用电器和电动工具电动机的滴浸。

用户使用前应在漆中加入 K_2 固化剂，加入量为 1/100，加入后必须搅拌均匀。一般的浸渍件可不预烘，如很潮的浸渍件应预烘后冷至室温再滴漆。

2.2 无溶剂整浸树脂——9105F 级无溶剂漆

我国从 20 世纪 70 年代开始 VPI 绝缘体系的研究工作，鉴于当时国内的技术水平，缺乏少胶云母带和与之配套的浸渍树脂，80 年代初，采用了折中的过渡办法，即中胶 VPI 绝缘体系。按当时中胶 VPI 绝缘体系的需求，国内研制并批量生产了与中胶带 9543—1 F 级整浸粉云母带匹配的 9105F 级无溶剂漆，并广泛应用于高压中型电机组中。

9105F 级无溶剂漆由环氧树脂、活性稀释剂和硼胺类固化剂配制而成。

2.2.1 物理性能

9105F 级无溶剂漆的物理性能列于表 1.2-84。

表 1.2-84 9105F 级无溶剂漆的物理性能

指标名称	单位	试验值
外观	—	外观为浅黄色透明液体、无机械杂质
黏度(4 号黏度计，23℃±2℃，10h 后测)	s	≤60

2.2.2 介电性能

9105F 级无溶剂漆的介电性能列于表 1.2-85。

表 1.2-85 9105F 级无溶剂漆的介电性能

指标名称		单位	试验值
电气强度(常态)		MV/m	≥25
介质损耗因数	常态	%	≤1
	热态(155℃±2℃)	%	≤3

2.2.3 热性能

9105F 级无溶剂漆的热性能列于表 1.2-86。

表 1.2-86 9105F 级无溶剂漆的热性能

指标名称	单 位	试验值
凝胶时间（170℃±2℃）	min	60
耐热等级	—	F级

2.2.4 产品特点

9105F 级无溶剂漆是一种优良的绝缘整浸无溶剂漆，具有良好的储存稳定性、防潮性及力学、电气性能，耐热等级F级。

2.2.5 适用范围和应用技术

9105F 级无溶剂漆与 9543—1 F 级整浸粉云母带配套使用，采用真空压力浸渍工艺，适用于 F 级高压电机整浸绝缘。

2.3 其他无溶剂浸渍树脂

2.3.1 H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂

H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂是 F 级产品。H9110 树脂是在 9110 的基础上经改进而制得，耐热等级为F级。H9110 树脂主要组成是亚胺改性不饱和聚酯树脂，活性溶剂是苯乙烯。

2.3.1.1 物理性能

H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的物理性能列于表 1.2-87。

表 1.2-87 H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的物理性能

指标名称	单 位	试 验 值
外 观	—	深棕色透明液，无机械杂质，漆膜平整
黏度（4 号黏度计 23℃±1℃）	s	37
胶凝时间（135℃±1℃）	min	9.0
储存稳定性（60℃±2℃，96h）	倍	0.01
厚层固化性	—	S_1、U_1、$I_{2.2}$均匀
密度，23℃±1℃	g/cm^3	1.053

注 表中数据由机械工业电工材料产品质量监督检测中心提供。

2.3.1.2 介电性能

H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的介电性能列于表 1.2-88。

表 1.2-88 H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的介电性能

指标名称	单 位	试 验 值
电气强度（23℃±2℃）	MV/m	23.6
介质损耗因数（23℃±2℃，155℃±2℃）	—	0.0062
		0.0026
体积电阻率（23℃±2℃）	Ω·m	1.8×10^{14}

2.3.1.3 产品特点

H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂特点是低黏度、单组分、储存期长，对湿度不敏感，固化温度低，固化时间短并具有良好的电气性能、耐热性、耐化学性和工艺性等。

H9110 还具有良好的渗透性，与同系列的少胶粉云母带配套，适用于高压电机的 VPI 工艺浸渍，电气强度高，介质损耗因数低。

2.3.1.4 适用范围和应用技术

H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂适用于 F 级交直流电机、变压器绕组的浸渍，可用于普通浸渍、滚浸和真空压力浸渍。用 H9110 专用稀释剂调整至所需要的黏度，加入稀释剂后，必须搅拌均匀。一般的浸渍件可不预烘，较大的浸渍件或很潮的浸渍件应预烘后冷至室温后浸渍。

2.3.2 H9140 环氧无溶剂浸渍树脂

H9140 环氧无溶剂浸渍树脂是 F 级产品，由不饱和环氧酯、乙烯基单体和多种添加剂组成。

2.3.2.1 物理性能

H9140 环氧无溶剂浸渍树脂的物理性能列于表 1.2-89。

表 1.2-89 H9140 环氧无溶剂浸渍树脂的物理性能

指标名称	单 位	试 验 值
外 观	—	均匀透明液体，无机械杂质
黏度（4 号黏度计，23℃±1℃）	s	23
胶凝时间（135℃±2℃）	min	12.87
储存稳定性（60℃±2℃，96h）	倍	0.065
密度（25℃±2℃）	g/cm^3	1.06
酸值	KOHmg/g	3.99

2.3.2.2 介电性能

H9140 环氧无溶剂浸渍树脂的介电性能列于表 1.2-90。

表 1.2-90 H9140 环氧无溶剂浸渍树脂的介电性能

指标名称		单 位	试验值
电气强度（常态）		MV/m	33
介质损耗因数	常 态	—	0.007
	155℃±2℃		0.024 8
体积电阻率	常 态	Ω·m	3.2×10^{14}
	155℃±2℃		2.7×10^{10}
	常态，浸水 7d		1.3×10^{14}

2.3.2.3 产品特点

H9140 环氧无溶剂浸渍树脂黏度小，凝胶时间适中，储存稳定性好；固化后具有优良的机、电、热性能和耐氟里昂性能。H9140 和其相匹配的中胶带、少胶带，配套用于 VPI 工艺时，浸透性能好，固化工艺幅度宽，固化后线圈整体性好，tanδ 小，电气强度高，可达到《大型交流整体浸渍电机圈式定子线圈成品质量分等标准》的要求，H9140 的储存期比较长，一般室温下储存期不少于 1 年。H9140 具有较好的耐氟里昂性能。

2.3.2.4 适用范围和应用技术

H9140 环氧无溶剂浸渍树脂适用于大中型高压电机（13.5kV 以下）及其他电机、电器绕组 VPI 工艺浸渍绝缘处理。

2.3.3 H9150 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂

H9150 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂是 H 级产品。H9150 的主要组分是亚胺改性不饱和聚酯树脂，活性单体为苯乙烯。

2.3.3.1 物理性能

H9150 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的物理性能列于表 1.2-91。

表 1.2-91 H9150 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的物理性能

指标名称	单 位	试 验 值
外 观	—	漆液为深棕色透明液，无机械杂质，漆膜平整
黏度（4 号黏度计，23℃±1℃）	s	59

续表

指 标 名 称	单 位	试 验 值
胶凝时间（135℃±1℃）	min	10.62
储存稳定性（60℃±2℃，96h）	倍	0.20
厚层固化性	—	S_1、U_1、$I_{2.2}$

2.3.3.2 介电性能

H9150 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的介电性能列于表 1.2-92。

表 1.2-92 H9150 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的介电性能

指 标 名 称		单 位	试 验 值
电气强度（常态）		MV/m	25.2
体积电阻率	常 态	Ω·m	1.2×10^{14}
	180℃±2℃		5.4×10^{8}

2.3.3.3 产品特点

H9150 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的特点是黏度适中、单组分、储存期长，对湿度不敏感、固化温度低、固化速度快。H9150 具有良好的电气性能、耐热性、耐化学性和工艺性能等特点。H9150 为单组分树脂，使用时不需再加固化剂。因而用户使用比较方便，免去了双组分混合时易产生称量不准确和搅拌不均匀的问题。

2.3.3.4 适用范围和应用技术

H9150 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂适用于 H 级交、直流电机和变压器绕组的浸渍。可用于普通浸渍和真空压力浸渍。由于 H9150 可在 150℃固化，固化速度快，因而也适用于浸烘流水线。

2.3.4 H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂

H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂是 220℃级无溶剂浸渍树脂。H9161 的主要组分是改性耐高温不饱和聚酯亚胺树脂，活性单体为苯乙烯。

2.3.4.1 物理性能

H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的物理性能列于表 1.2-93。

表 1.2-93 H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的物理性能

指标名称	单 位	试 验 值
外 观	—	漆液为深棕色透明液，无机械杂质，漆膜平整
黏度（4 号黏度计，23℃±1℃）	s	61
胶凝时间（135℃±1℃）	min	10.58
储存稳定性（60℃±2℃，96h）	倍	0.15
厚层固化性	—	S_1、U_1、$I_{2.2}$

2.3.4.2 介电性能

H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的介电性能列于表 1.2-94。

表 1.2-94 H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的介电性能

指 标 名 称		单 位	试 验 值
电气强度（常态）		MV/m	25.8
体积电阻率	常 态	Ω·m	1.41×10^{14}
	常态，浸水 24h 后		6.00×10^{13}
	220℃±3℃		8.93×10^{8}

2.3.4.3 产品特点

H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂特点是黏度适中，单组分、储存期长，对湿度不敏感，固化温度低、固化速度快。

H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂具有良好的电气性能、耐热性、耐化学性和工艺性能好等特点。由于 H9161 可在 150℃固化，固化速度快，因而也适用于浸烘流水线。

H9161 为单组分树脂，使用时不需再加固化剂，因而用户使用比较方便，免去了双组分混合时易产生称量不准确和搅拌不均匀的问题。H9161 储存期长，23℃储存期不少于 24 个月。

2.3.4.4 适用范围和应用技术

H9161 改性耐高温不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂适用于 C 级交、直流电机、变压器绕组的浸渍。可用于普通浸渍和真空压力浸渍。无溶剂漆指的是不含有挥发性惰性溶剂，能整体固化的液体可聚合树脂组成物。使用无溶剂浸渍漆有以下优点：不含挥发性溶剂，能一次浸涂较厚的漆层，挂漆量大，直接高温烘焙，漆膜不起皱，无溶剂漆的固化过程是整体固化成型，无低分子生成物逸出。

2.3.5 无溶剂通用浸渍树脂

D026 环氧聚酯亚胺 B、F 级通用无溶剂浸渍树脂系由环氧化合物、亚胺化合物等经反应溶于活性稀释剂中组成的单组分 B、F 级通用无溶剂浸渍树脂。

2.3.5.1 物理性能

无溶剂通用浸渍树脂的物理性能列于表 1.2-95。

表 1.2-95 无溶剂通用浸渍树脂的物理性能

指 标 名 称	单 位	指 标 值
外 观	—	树脂应溶解均匀、不含机械杂质、干后漆膜光滑
黏度（4 号黏度计，23℃±2℃）	s	35±15
闪 点	℃	记录数据
漆在敞口容器中的稳定性	—	黏度增长不超过起始值的 4 倍

2.3.5.2 干燥性能

无溶剂通用浸渍树脂的干燥性能见表 1.2-96。

表 1.2-96 无溶剂通用浸渍树脂的干燥性能

指 标 名 称	单 位	指 标 值
凝胶时间（150℃±2℃）	min	≤9
厚层固化能力（15g 树脂，120℃±2℃/1h+140℃±2℃/3h）	—	不差于 S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀

2.3.5.3 电气性能

无溶剂通用浸渍树脂的电气性能列于表 1.2-97。

表 1.2-97 无溶剂通用浸渍树脂的电气性能

指 标 名 称		单 位	指 标 值
介电强度	常态时	MV/m	≥20
	155℃±2℃		≥16
	浸水 24h 后		≥16
体积电阻率	常 态	Ω·m	$\geq1.0\times10^{12}$
	浸水 7 天		$\geq1.0\times10^{10}$

2.3.5.4 力学性能

无溶剂通用浸渍树脂的力学性能见表 1.2-98。

表 1.2-98 无溶剂通用浸渍树脂的机械性能

指标名称		单位	指标值
粘结强度	常态	N	记录实测数据
	155℃±2℃		

2.3.5.5 化学性能

无溶剂通用浸渍树脂的化学性能列于表 1.2-99。

表 1.2-99 无溶剂通用浸渍树脂的化学性能

指标名称	指标值
漆对漆包线的作用(铅笔硬度)	≥1H
耐溶剂蒸汽性（苯、丙酮、甲醇、己烷、二硫化碳 23℃±2℃ 7天）	附着情况无变化，不剥落，不起泡，不流挂，不发粘（允许轻微发粘）。五种溶剂中任意通过两种

2.3.5.6 热性能

无溶剂通用浸渍树脂的热性能列于表 1.2-100。

表 1.2-100 无溶剂通用浸渍树脂的热性能

指标名称	指标值
温度指数	≥155

2.3.5.7 产品特点

D026 环氧聚酯亚胺 B、F 级通用无溶剂浸渍树脂产品耐热性好（F 级），能低温快速固化，储存稳定，适用范围宽；该产品还具有粘结牢固、绝缘电阻高等特点；用其处理绕组，浸渍一次即可达到要求。

2.3.5.8 适用范围和应用技术

该产品通过机械工业部上海中小型电机绝缘结构实验室按 UL、IEC 标准进行的电机评定，适用于 Y2 系列电机及其他 B、F 级电机、电器绕组绝缘浸渍处理。

由于 D026 含有催化固化的基团，因此 D026 具有低温快固化的特点。具体应用工艺应根据电机具体情况而定。在浸渍方式上可采用普通浸渍或真空压力浸渍（VIP）；在浸渍次数上可采用一次浸渍或两次浸渍，参考应用工艺如下：

白坯 40～60℃浸渍 15min，室温下滴干 15～30min，烘焙温度 130～150℃，烘焙时间 3～10h（根据电机情况定）。

无溶剂浸渍树脂由于采用活性稀释剂，活性稀释剂容易自聚，因此应注意控制浸漆时的温度不能过高。储存时要控制环境温度不超过标准规定。无溶剂浸渍树脂在使用过程中黏度会逐渐增大，要定期添加新的树脂或专用稀释剂，每次添加专用稀释剂时不能超过总量的 5%。

2.3.6 上 1140F 级无溶济浸渍漆

上 1140F 级无溶济浸渍漆是由耐高温聚酯、环氧树脂和活性稀释剂等材料为主，经化学反应而成的单组分浸渍胶。上 1140F 级无溶济浸渍漆用于耐热等级为 F 级、H 级的电机电器线圈的绝缘处理。

上 1140F 级无溶济浸渍漆是由含有苯环结构的耐高温聚酯树脂、双酚 A 环氧树脂和活性稀释剂混和而成的单组分漆。聚酯树脂中含有不饱和双键和羧基以及羟基，在加热升温时不饱和双键可以和活性稀释剂反应，羧基和羟基可以和环氧树脂中的环氧基反应，从而可以固化成三维结构的硬性耐热材料。

2.3.6.1 主要性能指标

上 1140F 级无溶济浸渍漆的外观为黄棕色透明溶液，无机械杂质。主要性能指标见表 1.2-101。

表 1.2-101 上 1140F 级无溶济浸渍漆的主要性能指标

指标名称		单位	指标值
黏度在 23℃±2℃下用 B2-4 号黏度计测定		s	30～70
胶凝时间 140℃±1℃		min	≤10
厚层干燥时间 140℃±1℃		min	≤30
电气强度	常态	MV/m	≥20
	浸水 24h		≥15
体积电阻率	常态	Ω·m	$>1.0\times10^{12}$
	浸水 24h		$>1.0\times10^{10}$
储存期 23℃±2℃下		月	>6

2.3.6.2 产品特点以及适用范围

上 1140F 级无溶济浸渍漆具有优异的固化性能，固化后具有良好的电气性能，它能用于耐热等级为 F 级、H 级的电机电器线圈的绝缘处理。

2.3.7 GY1160 无溶剂浸渍漆

C 级及以上耐温等级无溶剂浸渍漆的开发是绝缘材料领域的热点和难点问题之一。以二苯醚聚酯为基础原料，加入多种耐热组分进行改性，制成 C 级 GY1160 无溶剂浸渍漆。该漆储存稳定性好，粘结性优良，固化挥发分小，适用于耐热等级较高的电机和变压器等的绝缘浸渍和浇铸。

GY1160 无溶剂浸渍漆的组成：聚酯改性二苯醚树脂为基体材料，赛克等为耐热改性剂，苯乙烯为活性稀释剂。

2.3.7.1 物理性能

GY1160 无溶剂浸渍漆的物理性能列于表 1.2-102。

表 1.2-102 GY1160 无溶剂浸渍漆的物理性能

试验项目	试验值
外观	浅黄色透明液体，无机械杂质
粘度	80～110s

2.3.7.2 介电性能

GY1160 无溶剂浸渍漆的介电性能列于表 1.2-103。

表 1.2-103 GY1160 无溶剂浸渍漆的介电性能

试验项目		单位	试验值
电气强度	常态	MV/m	21.1～56
	浸水 24h 后		19.79
体积电阻率	常态	Ω·m	7.34×10^{15}
	浸水 24h 后		7.2×10^{15}

2.3.7.3 耐化学性能

分别耐苯、丙酮、己烷、二硫化碳、甲醇等溶剂。

2.3.7.4 热性能

GY1160 无溶剂浸渍漆的热性能列于表 1.2-104。

表 1.2-104 GY1160 无溶剂浸渍漆的热性能

试验项目	试验值
胶凝时间（min）	6min35s
固化挥发分（%）	15.2
厚层固化能力	S_1，U_1，$I_{1.2.1}$均匀
粘结强度	700～800

2.3.7.5 产品特点

Y1160 无溶剂浸渍漆具有较强的粘接强度和较好的机械强度，电气综合性能突出、工艺应用性能良好等特点。

电机的应用试验结果表明，该漆具有较好工艺应用性、电气性能优异，适合于各种 200 级耐高温电器、电机的绝缘处理。

该漆黏度适中、胶化温度低、固化速度快、浸渍流失量小，适合于一般真空压力浸漆设备及烘培设备。

该漆性能稳定、储存期较长、具有较好的环境适应性。

该漆成本适中、生产工艺简单、质量稳定。

2.3.7.6 适用范围和应用技术

该产品适用于各种电机、电器及变压器绕组的 200 级绝缘处理。

2.3.8 118—1F、H 级通用无溶剂浸渍漆

118—1F、H 级通用无溶剂浸渍漆适用于高压电机和干式变压器的 F、H 级无溶剂浸渍漆，以其挂漆量大、固化快、使用方便、绝缘性能好等优点而成为无溶剂漆的发展趋势，118—1F、H 通用无溶剂浸渍漆，具有黏度小、固化快、挥发物小、储存稳定性好的特点同时具有优良的电气性能、耐热性和防潮性，要用为 H 级无溶剂浸渍漆，适用于电机滴浸、整浸、常压浸渍和真空压力浸渍绝缘处理，已形成无溶剂漆产品的多元化、多样化，能满足各型电机的各种使用要求。

118—1 漆是以环氧改性的耐热不饱和聚酯为主体树脂与稀释剂、引发剂等助剂复合而成。

2.3.8.1 主要性能指标

118—1 通用无溶剂浸渍漆的主要性能指标见表 1.2-105。

表 1.2-105 118-1 通用无溶剂浸渍漆的主要性能指标

指标名称		单位	指标值
外观		—	棕红色透明粘稠液体，无机械杂质
黏度（4 号黏度计，23℃±1℃）		s	30～70
固体挥发物（150℃/3h，10g 样）		%	≤20
厚层固化能力		—	S_1、U_1、$I_{2.2}$
电气强度	常态时	MV/m	≥20
	浸水 24h 后		≥18
	180℃±2℃		≥16
体积电阻率	常态时	Ω·m	$\geq 1.0\times10^{13}$
	浸水 24h 后		$\geq 1.0\times10^{12}$
	180℃±2℃		$\geq 1.0\times10^{8}$
闭口容器中储存（60℃±2℃/96h）		—	黏度增长不大于 4 倍

2.3.8.2 产品特点

（1）挂漆量大，无溶剂漆能一次浸涂较厚的漆层，直接高温烘焙可提高生产效率，节约能源消耗，118—1 漆在微电机上定子平均挂漆量为 88.6%，在转子上平均挂漆量为 91%，在烘焙过程中漆液流失及挥发很小，漆膜不起泡、不起皱。

（2）固化快，118—1 漆在 135℃时 3h 后热态电阻稳定，节省能源、降低成本、节约工艺时间、能有效的提高生产效率。

（3）防潮性好，118—1 漆具有耐湿热性、浸水 24h 电气强度变化很小，可用于一些比较潮湿的环境、电阻系数高，可减少浸渍次数，降低成本，达到国内同类产品先进水平。

（4）能与其他牌号无溶剂漆以不同比例混合，市场上常用的 F、H 级无溶剂漆如 319—2、1148、1150 等可以任意比例相混合，未发生混浊、分层、凝胶现象，电气性能、厚层固化性能、固化挥发份、储存稳定性均在合格范围内。

2.3.8.3 适用范围和技术要求

118—1F、H 通用无溶剂浸渍漆在某煤矿电机上的应用，煤矿电机用条件严酷、绝缘要求高，在 YSB—110 煤矿电机上应用，可采用真空压力浸渍、浸烘一遍漆的定子绕组电阻稳定在 300MΩ 以上，浸烘二遍漆的定子绕组电阻值在 200 MΩ 以上，比一般的无溶剂浸渍漆高 5～6 倍，在微电机上也有广泛应用，选用 HLJ300—2 型交流两用串励减速电动机上应用，定子、转子绕组浸烘后，绕组粘结坚实、整体性良好、外观整洁、常态、热态绝缘性能良好，现在也用于牵引电机、干式变压器等高压大中型电机浸渍绝缘。

2.3.9 无溶剂滴浸树脂

无溶剂滴浸树脂是将无溶剂漆连续滴落在经过预热旋转的绕组的一端，漆遇热黏度变小，顺着线匝间隙渗透，直至把整个绕组缝隙填满。

D025 环氧亚胺无溶剂滴浸树脂系由环氧化合物、亚胺化合物等溶于活性稀释剂中组成的双组分 B、F 级通用无溶剂浸渍树脂。

2.3.9.1 物理性能

D025 环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的物理性能列于表 1.2-106。

表 1.2-106 D025 环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的物理性能

指标名称		单位	指标值
外观	甲组分	—	浅黄色均匀透明液体，无机械杂质
	乙组分	—	红棕色均匀透明液体，无机械杂质
	树脂	—	溶解均匀、不乳浊、无杂质、干后漆膜光滑
黏度（4 号黏度计，23℃±2℃）		s	≤150
闪点		℃	记录实测数据

2.3.9.2 干燥性能

D025 环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的干燥性能见表 1.2-107。

表 1.2-107 D025 环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的干燥性能

指标名称	单位	指标值
凝胶时间 130℃±2℃	min	≤9
厚层固化能力（10g 树脂，130℃±2℃/1h）	—	不次于 S_1、U_1、$I_{4.2}$，均匀

2.3.9.3 电气性能

D025 环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的电气性能列于表 1.2-108。

表 1.2-108 D025 环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的电气性能

指标名称		单位	指标值
体积电阻率	常态	Ω·m	$\geq 1.0\times10^{12}$
	155℃±2℃		$\geq 1.0\times10^{8}$
	浸水 7 天后		$\geq 1.0\times10^{10}$
介电强度	常态	MV/m	≥20
	155℃±2℃		≥16
	浸水 24h 后		≥16

2.3.9.4 力学性能

D025环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的力学性能见表1.2-109。

表1.2-109 D025环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的力学性能

指标名称		单位	指标值
粘结强度	常态	N	记录（实测值）
	155℃±2℃		

2.3.9.5 化学性能

D025环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的化学性能见表1.2-110。

表1.2-110 D025环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的化学性能

指标名称	指标值
树脂对漆包线的作用（铅笔硬度）	≥2H
耐溶剂蒸汽性（苯、丙酮、甲醇、已烷、二硫化碳）	附着情况无变化、不剥落、不起泡、不流挂、不发粘（允许轻微发粘），5种任意通过两种

2.3.9.6 热性能

D025环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的热性能见表1.2-111。

表1.2-111 D025环氧亚胺无溶剂滴浸树脂的热性能

指标名称	指标值
温度指数	≥155

2.3.9.7 产品特点

无溶剂滴浸树脂的特点是漆的初始黏度较大，遇热黏度变小，进而快速固化，在一定温度下，只需数10min即可完成全部固化过程。该产品耐热性好（F级），与同类产品相比，能低温快速固化、B、F级通用，还具有粘结牢固、电机温升低、绝缘电阻高等特点。

2.3.9.8 适用范围和应用技术

D025环氧亚胺无溶剂滴浸树脂适用于B、F级电机、电器线圈绝缘滴浸处理。

应用参考工艺要点：滴浸时间为50～60s；驱潮预热温度为120～130℃；凝胶温度为140～150℃，固化温度为150～155℃，视工件大小及滴浸设备情况来确定节拍时间，以保证电性能合格为原则。

D025环氧亚胺无溶剂滴浸树脂采用甲、乙组分别包装，使用时要严格按甲：乙=1：2（质量比）混合均匀，使用时间为48h，夏季最好在24h内用完。

2.3.10 无溶剂沉浸树脂

无溶剂沉浸树脂的特点是黏度小，储存期长，使用工艺方法简单。浸漆工艺可以普通沉浸，也可以进行连续沉浸。

D033环保型F级无溶剂连续沉浸树脂是由改性特种树脂、环保型活性稀释剂和多种助剂配制而成。

D034 B级无溶剂连续沉浸树脂是由环氧树脂为主体，以少量聚酯改性，加入多种助剂，溶解于活性稀释剂中制成的双组分无溶剂浸渍树脂。

2.3.10.1 物理性能

无溶剂沉浸树脂的物理性能见表1.2-112。

表1.2-112 无溶剂沉浸树脂的物理性能

指标名称	单位	指标值	
		D033	D034
外观	—	树脂应溶解均匀，干后漆膜光滑	树脂应溶解均匀，干后漆膜光滑
黏度4号黏度计23℃±2℃	s	15±3	10～16
固化挥发分	%	≤10	—
敞口储存稳定性	—	黏度增长不超过起始值的4倍	—
适用期（30℃以下）	天	≥30不凝胶	≥10不凝胶

2.3.10.2 干燥性能

无溶剂沉浸树脂的干燥性能列于表1.2-113。

表1.2-113 无溶剂沉浸树脂的干燥性能

指标名称	单位	指标值	
		D033	D034
胶凝时间	min	≤9/110℃±2℃	6±3/125℃±2℃
漆膜干燥时间120℃±2℃	min	≤20，不粘	
厚层固化能力	—	不差于$S_{1.1}$、$U_{1.1}$、$I_{4.2}$，均匀	不差于$S_{1.1}$、$U_{1.1}$、$I_{4.2}$，均匀，125℃，30min

2.3.10.3 电气性能

无溶剂沉浸树脂的电气性能列于表1.2-114。

表1.2-114 无溶剂沉浸树脂的电气性能

指标名称		单位	指标值	
			D033	D034
体积电阻率	常态	Ω·m	≥1.0×10^{12}	≥1.0×10^{12}
	浸水7天后		≥1.0×10^{8}	≥1.0×10^{10}
介电强度	常态	MV/m	≥20	≥20
	130℃	—	—	≥16
	浸水24h后	—	—	≥16

2.3.10.4 热性能

无溶剂沉浸树脂的热性能列于表1.2-115。

表1.2-115 无溶剂沉浸树脂的热性能

指标名称	指标值	
	D033	D034
温度指数	≥155	≥130

2.3.10.5 产品特点

D033环保漆是系列环保漆之一，是我国863项目“环保型高耐热绝缘材料及其产业化”系列产品之一，是一种无臭的非苯乙烯体系的低挥发快固化无溶剂漆。具有以下特点：

（1）无毒无臭，有利于职工身体健康。

（2）挥发性小，易燃、易爆危险性小，有利于安全生产。

（3）挥发份低，对大气的污染小，有利于环境保护。

（4）低温快干，节约能源，提高工效。

（5）机电性能和耐热性能好，可B、F级通用。

D034产品具有优异的综合机电性能和良好的浸渍工艺性；具有干燥温度低、固化速度快的特点，固化后漆膜坚韧、光亮，热弹性好、漆瘤少。

2.3.10.6 适用范围和应用技术

（1）D033产品适用于中小型B级电机及其他小型或微

型电机、电器用线圈的快干连续沉浸处理，如洗衣机电机、风扇电机的连续沉浸；适用于电子产品用电机、变压器、电容器等线圈的绝缘浸渍处理；适合进口和国产各类自动连续沉浸设备。

按甲组分：乙组分＝1：1(质量比)倒入漆槽内，搅拌均匀后即可使用。配好后的树脂，使用黏度为 12～15s；首次现配使用，无须用专用稀释剂调配。

连续沉浸自动线的常见流程：

上机—→预热 3 节拍—→自动冷却 3 节拍—→沉浸 1 节拍—→滴干 2 节拍—→烘熵—固化 15～20 节拍—→下机

参考工艺参数

树脂黏度：12～15s 4 号黏度计 23℃±2℃

浸渍时间：1～3min

预热温度：105～125℃；国内现有连续沉浸设备，一般预热段和最后固化段都在同一箱体内，因此预热温度不宜过低，应保证高于水的沸点。

程序时间：4～8min；视工件大小、设备情况（烘炉长度、工位个数）调整控制。

烘焙温度：115～135℃ 根据工件尺寸等具体条件确定烘焙温度和程序时间。为保证良好的绝缘处理效果并尽可能降低能耗、节约工时，一般在 125～135℃保温烘焙，总体凝胶—固化的烘焙时间约为 60～80min。必要时可适当调整程序时间，以固化完全、绝缘电阻或介损稳定为准则。

(2) D034 产品适用于中小型 B 级电机及其他小型或微型电机、电器用线圈的快干连续沉浸处理，如洗衣机电机、风扇电机的连续沉浸；适用于电子产品用电机、变压器、电容器等线圈的绝缘浸渍处理；适合进口和国产各类自动连续沉浸设备。

1) 应用参考工艺要点：

配漆按甲组分：乙组分＝1：1(质量比)倒入漆槽内，搅拌均匀后即可使用。配好后的树脂，使用黏度为 12～15s；首次现配使用，无须用专用稀释剂调配。

2) 连续沉浸自动线的常见流程：

上机—→预热 3 节拍—→自动冷却 3 节拍—→沉浸 1 节拍—→滴干 2 节拍—→烘熵—固化 15～20 节拍—→下机

3) 参考工艺参数：

树脂黏度：12～15s 4 号黏度计 23℃±2℃

浸渍时间：1～3min

预热温度：105～125℃；国内现有连续沉浸设备，一般预热段和最后固化段都在同一箱体内，因此预热温度不宜过低，应保证高于水的沸点。

程序时间：4～8min；视工件大小、设备情况（烘炉长度、工位个数）调整控制。

烘焙温度：120～140℃ 根据工件尺寸等具体条件确定烘焙温度和程序时间。为保证良好的绝缘处理效果并尽可能降低能耗、节约工时，一般在 125～135℃保温烘焙，总体凝胶—固化的烘焙时间约为 60～80min。必要时可适当调整程序时间，以固化完全、绝缘电阻或介质损耗因数稳定为准则。

2.3.11 无溶剂整浸树脂

无溶剂整浸树脂又称高压无溶剂漆。是用于 3kV 以上的大、中型高压电机用的浸渍漆。无溶剂整浸树脂必须在高温下具有低的介质损耗因数，并需与粉云母带相匹配使用。

以 D027 环氧无溶剂整浸树脂为例，系由环氧树脂、不饱和酸（酐）、活性稀释剂和多种添加剂组成。

2.3.11.1 物理性能

无溶剂整浸树脂的物理性能列于表 1.2-116。

表 1.2-116 无溶剂整浸树脂的物理性能

指标名称	单位	指标值
外观	—	均匀透明液体，无机械杂质
黏度（4 号黏度计，23℃±2℃）	s	19±3.0
密度（25℃±2℃）	g/cm^3	1.1±0.02
酸值	mgKOH/g	≤10.0
漆在闭口容器中的储存稳定性	—	黏度增长不超过起始值的 0.3 倍

2.3.11.2 干燥性能

无溶剂整浸树脂的干燥性能列于表 1.2-117。

表 1.2-117 无溶剂整浸树脂的干燥性能

指标名称	单位	指标值
胶凝时间（135℃±2℃，试管法）	min	10～30.0

2.3.11.3 电气性能

无溶剂整浸树脂的电气性能列于表 1.2-118。

表 1.2-118 无溶剂整浸树脂的电气性能

指标名称		单位	指标值
体积电阻率	常态	Ω·m	≥1.0×10^{12}
	155℃±2℃		≥1.0×10^{9}
	浸水 7 天后		≥1.0×10^{10}
介电强度	常态	MV/m	≥25.0
介质损耗因数	常态	%	≤1.0
	155℃±2℃		≤3.0

2.3.11.4 热性能

无溶剂整浸树脂的热性能列于表 1.2-119。

表 1.2-119 无溶剂整浸树脂的热性能

指标名称	指标值
温度指数	≥155

2.3.11.5 产品特点

D027 环氧无溶剂整浸树脂固化前具有优异的储存稳定性和浸渍工艺性，固化后具有优良的电气、力学性能和耐氟里昂性能。

2.3.11.6 适用范围和应用技术

D027 环氧无溶剂整浸树脂与 5444—1(D607 1)环氧玻璃中胶粉云母带(或少胶云母带)配套，适用于 VPI 工艺作为工作温度为 155℃的大、中型高压电机及其他各种电机、电器的线圈浸渍绝缘。

应用参考工艺要点：

当与 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带（或少胶云母带）配套使用于高压电机定子线圈绝缘时，建议浸渍后线圈直接进入 110℃左右的烘炉，保温 2～3h 后再以 10℃/h 的速度升温至预定保温温度。推荐烘焙温度为 150～170℃/10～20h。

本产品严防胺类和碱类物质的污染，以免影响储存稳定性和固化后的电气性能。

无溶剂浸渍树脂由于采用苯乙烯作活性稀释剂，苯乙烯易自聚，因此应注意控制浸漆时的温度不能过高。储存时要控制环境温度不超过标准规定。无溶剂浸渍树脂在使用过程中黏度会逐渐增大，要定期添加新的树脂或苯乙烯，添加苯乙烯时不能超过总量的 5%。

第 3 章　浸渍纤维制品

1　绝缘漆布

绝缘漆布是以棉布、纺绸、合成纤维布或者玻璃布为底材，经浸渍或涂合成树脂漆，再经烘焙、干燥而成的柔软绝缘材料。绝缘漆布具有良好机械强度和柔软性以及较高的介电性能，广泛用于电机、电器、电工仪表和日用电器的线圈包扎、衬垫绝缘和配线绝缘，也用于制造复合材料。

以棉布和纺绸为底材的绝缘漆布和漆绸，可作一般电机、电器绝缘。其特点是机械强度高，柔软性好，但耐热性低，防潮、防霉性差，现已逐渐被合成纤维和玻璃纤维材料取代。

以无碱玻璃布为底材的绝缘漆布，具有良好的物理、力学和介电性能，并具有防潮、防霉，耐酸碱、耐高温等特性。玻璃布浸渍各种不同的合成树脂漆，可以制成不同耐热等级材料，用于 A 到 H 级的电机、电器绝缘。

1.1　绝缘漆布的品种、组成和用途

绝缘漆布的品种和用途见表 1.3-1，组成成分见表 1.3-2。

表 1.3-1　　绝缘漆布的品种和用途

产品名称	耐热等级	用　途
油性漆布（2010、2012）	A	2010 适应于一般电机、电器的线圈包扎和衬垫绝缘 2012 适用于变压器及耐油的线圈和衬垫绝缘
油性漆绸（2210、2212）	A	2210 适用于一般电机、电器线圈薄层绝缘 2212 适用于耐变压器油的线圈薄层绝缘
油性玻璃漆布（2432）	A	适用于电机、变压器及耐油的线圈绝缘，可代替 2010 和 2012
沥青醇酸玻璃漆布（2430）	B	适用于电机线圈包扎和衬垫绝缘
醇酸玻璃漆布（2432）	B	适用于电机、电器及耐变压器油的包线包扎和衬垫绝缘
聚酯玻璃漆布（2440）	F	适用于 F 级电机、电器线圈包扎和衬垫绝缘
有机硅玻璃漆布（2450、2451）	H	适用于 H 级电机、电器线圈包扎和衬垫绝缘，2450 为软型，2451 为纹型
硅橡胶玻璃漆布（2550）	H	适用于线圈端部绝缘和导线绝缘
聚酰亚胺玻璃漆布（2560）	H、C	适用于耐高温电机、电器衬垫和包扎绝缘

表 1.3-2　　绝缘漆布的组成成分

组成成分 \ 型号	2010 2012	2210 2212	2412	2430	2432	2440	2450 2451	2550	2560
3434 白细布	○								
纺绸		○							
无碱玻璃布			○	○	○	○	○	○	○
油基清漆	○	○	○						
沥青醇酸漆				○					
三聚氰胺醇酸漆					○				
耐热聚酯漆						○			
有机硅漆							○		
硅橡胶溶液								○	
聚酰亚胺漆									○

注　○表示含有成分。

1.2　绝缘漆布的性能

绝缘漆布的物理、力学和介电性能见表 1.3-3 和表 1.3-4，漆布与浸渍漆的相容性见表 1.3-5。

表 1.3-3　　绝缘漆布的物理、力学性能

产品型号及名称	标称厚度（mm）	拉伸强度[N(kg·f)/10mm 宽]										断裂伸长率（%）	
		经　向		纬　向	45℃向		斜切漆布带						
							底布浸渍前搭接处标准值	底布浸漆后搭接处		标定伸长率为 6%时		经向	45℃向
		标准值	实测值	标准值	标准值	实测值		标准值	实测值	标准值	实测值		
油性漆布（2010）	0.15±0.015	60(6.1)	6.1～8	45(4.6)	35(3.6)	3.6～4.0	30(3.1)	17(1.7)	>2.4	24(2.4)	<2.4	3	15
	0.18±0.018	66(6.7)	6.7～8.5	45(4.6)	40(4.1)	4.1～4.7	35(3.6)	17(1.7)	>2.7	29(3.0)	<3.0	3	15
	0.20±0.020	70(7.1)	7.1～10	45(4.6)	45(4.6)	4.6～5.3	35(3.6)	17(1.7)	>2.7	29(3.0)	<3.0	3	20
	0.25±0.025	80(8.2)	8.2～11	50(5.1)	50(5.1)	5.1～6.0	40(4.1)	17(1.7)	>2.7	29(3.0)	<3.0	3	20
	0.30±0.030	90(9.2)	—	50(5.1)	55(5.6)	—	50(5.1)	17(1.7)	—	34(3.5)	—	3	20
油性漆布（2012）	0.15±0.015	60(6.1)	—	45(4.6)	35(3.6)	—	30(3.1)	17(1.7)	—	24(2.4)	<2.4	3	15
	0.18±0.018	66(6.7)	6.7～8.5	45(4.6)	40(4.1)	4.1～4.7	35(3.6)	17(1.7)	>2.7	29(3.0)	<3.0	3	15
	0.20±0.02	70(7.1)	7.1～10	45(4.6)	45(4.6)	4.6～5.3	35(3.6)	17(1.7)	>2.7	29(3.0)	<3.0	3	20
	0.25±0.025	80(8.2)	8.2～11	50(5.1)	50(5.1)	5.1～6.0	40(4.1)	17(1.7)	>2.7	29(3.0)	<3.0	3	20
	0.30±0.030	90(9.2)	—	50(5.1)	55(5.6)	—	50(5.1)	17(1.7)	—	34(3.5)	—	3	20

续表

产品型号及名称	标称厚度(mm)	拉伸强度[N(kg·f)/10mm 宽]										断裂伸长率(%)	
		经向		纬向	45℃向		斜切漆布带						
							底布浸渍前搭接处标准值	底布浸漆后搭接处		标定伸长率为 6%时		经向	45℃向
		标准值	实测值	标准值	标准值	实测值		标准值	实测值	标准值	实测值		
油性漆绸(2210)	0.04±0.005	20(2.0)	2~2.7	12(1.2)	12(1.2)	1.2~2.7	—	—	—	1~9(0.1~0.9)	—	—	—
	0.05±0.005	20(2.0)	2~2.7	12(1.2)	12(1.2)	1.2~2.7				1~9(0.1~0.9)			
	0.06±0.01	20(2.0)	2~3.3	12(1.2)	12(1.2)	1.2~3.0				2~12(0.2~1.2)			
	0.08±0.01	29(3.0)	3~6.0	17(1.7)	17(1.7)	1.7~3.3				2~12(0.2~1.2)			
	0.10±0.01	29(3.0)	3~6.0	17(1.7)	17(1.7)	1.7~3.7				2~12(0.2~1.2)			
	0.12±0.015	36(3.7)	3.7~6.3	20(2.0)	20(2.0)	2.0~5.3				3~15(0.3~1.5)			
	0.15±0.015	36(3.7)	3.7~6.7	20(2.0)	20(2.0)	2.0~5.3				3~15(0.3~1.5)			
油性漆绸(2212)	0.04±0.005	20(2.0)	—	12(1.2)	12(1.2)	—	—	—	—	1~9(0.1~0.9)	—	—	—
	0.05±0.05	20(2.0)	—	12(1.2)	12(1.2)	—				1~9(0.1~0.9)			
	0.06±0.060	20(2.0)	—	12(1.2)	12(1.2)	—				2~12(0.2~1.2)			
	0.08±0.010	29(3.0)	3~6	17(1.7)	17(1.7)	1.7~3.3				2~12(0.2~1.2)			
	0.10±0.010	29(3.0)	3~6	17(1.7)	17(1.7)	1.7~3.7				2~12(0.2~1.2)			
	0.12±0.015	36(3.7)	3.7~6.3	20(2.0)	20(2.0)	2.0~5.3				3~15(0.3~1.5)			
	0.15±0.015	36(3.7)	3.7~6.7	20(2.0)	20(2.0)	2.0~5.3				3~15(0.3~1.5)			

表 1.3-4　　绝缘漆布的介电性能

产品名称	厚度(mm)	击穿电压(kV)											体积电阻率(Ω·cm)		
		常态时		常态弯折后		热态时		热处理弯折后	受潮后		标定伸长率为 6%时		常态时	热态时	受潮后
		标准值	实测值	标准值	实测值	标准值	实测值	标准值	标准值	实测值	标准值	实测值	实测值	实测值	实测值
油性漆布(2010)	0.15	6.0	6~8		3.6~5.0	4.0	4~7.0			3.6~8	4.2	>4.8	1.10×10^{13}~1.10×10^{15}	1.10^{10}~1.10^{12}(105℃)	1.10^{10}~1.10^{13}
	0.18	7.0	7~8.5		4.2~5.5	4.5	4.5~7.6			4.1~7.0	4.8	>4.8			
	0.20	7.5	7.5~9.0		4.6~5.6	5.0	5~9.0			4.6~8.0	5.3	>5.3			
	0.25	9.0	9~10.0		5.3~7.0	6.0	6~10.0			5.4~9.0	6.2	>6.2			
	0.30	10.0				7.0					7.0				
油性漆布(2012)											4.2				
	0.15	6.5			3.4~4.0	4.4	5.2~8.0			4.7~8	4.8				
	0.18	7.7	7.7~8.5		3.6~5.0	5.2	5.9~9.0			5.4~9	5.3	>4.8	10^{13}~10^{15}	10^{10}~10^{12}(105℃)	10^{10}~10^{13}
	0.20	8.6	8.6~9.5		4.0~6.0	5.9	6.8~10			6.0~10	6.2	>5.3			
	0.25	9.8	9.8~11.0			6.8					7.0	>6.2			
	0.30	11.0				7.5									
油性漆绸(2210)	0.08	4.8	4.8~5.5	3.0	3~5	3.0	3~4	2.5	2.3	2.3~4			10^{13}~10^{15}	10^{10}~10^{12}(105℃)	10^{10}~10^{13}
	0.10	5.8	5.8~7.0	4.4	4.4~6	4.3	4.3~6	3.7	3.5	3.5~4.2	4.5	>4.5			
	0.12	7.2	7.2~8.0	6.3	6.3~7.5	5.2	5.2~7	4.0	4.1	4.1~4.5	5.5	>5.5			
	0.15	8.7	8.7~9.5	6.9	6.9~8.0	5.8	5.8~9.0	4.2	4.7	4.7~7.0	6.5	>6.5			
	0.04	1.0													
油性漆绸(2212)	0.05	1.7													
	0.06	3.3				1.0							10^{13}~10^{15}	10^{10}~10^{12}(105℃)	10^{10}~10^{13}
	0.08	5.4	5.4~6.5	3.2	3.2~5.0	3.3	3.3~5	2.5	3.2	3.2~4.0					
	0.10	7.0	7~8.0	5.2	5.2~6.5	4.8	4.8~6	4.2	4.2	4.2~5.5	4.5	>4.5			
	0.12	9.1	9.1~10	6.9	6.9~8.0	5.5	5.5~7	5.4	4.7	4.7~6.5	5.5	>5.0			
	0.15	9.8	9.8~11	7.7	7.7~9.0	7.4	7.4~8	5.8	5.5	5.5~7.5	6.5	>6.5			

产品名称	厚度(mm)		拉伸强度[N(kg·f)/10mm 宽]										断裂伸长率(%)		边缘抗撕力[N(kg·f)]	
	标准值	允许偏差	经向		纬向	45°向		斜切漆布带					经向	45°	经向	45°向
			标准值	实测值		标准值	实测值	玻璃布浸漆前搭接处	玻璃布浸漆后搭接处		45°向标定伸长率为 10%时					
									标准值	实测值	标准值	实测值	标准值	标准值	标准值	标准值
油性玻璃漆布(2412)	0.10	±0.010	70(7.1)	7.1~14	40(4.1)	40(4.1)	4.1~8	20(2.0)	2.0(20)	>2.0	2~12(0.2~1.2)		1.5	15	5.0(0.5)	50(5.1)
沥青玻璃漆布(2430)	0.12	±0.012	90(9.2)	9.2~14	50(5.1)	50(5.1)	5.1~8	25(2.6)	20(2.0)	>2.0	2~1.2(0.2~1.2)	—	1.5	15	6.0(0.6)	60(6.1)
醇酸玻璃漆布(2433)	0.15	±0.015	100(10.2)	10.2~21	60(6.1)	60(6.1)	6.1~9	30(3.1)	20(2.0)	>2.0	3~15(0.3~1.5)		2.0	1.5	8.0(0.8)	75(7.7)

续表

产品名称	厚度(mm)		拉伸强度[N(kg·f)/10mm宽]										断裂伸长率(%)		边缘抗撕力[N(kg·f)]	
			经向		纬向	45°向		斜切漆布带								
	标准值	允许偏差	标准值	实测值	标准值	标准值	实测值	玻璃布浸漆前搭接处	玻璃布浸漆后搭接处		45°向标定伸长率为10%时		经向	45°	经向	45°向
									标准值	实测值	标准值	实测值	标准值	标准值	标准值	标准值
聚酯玻璃漆布(2440)	0.18	±0.018	105(10.7)	10.7~21	65(6.6)	65(6.6)	6.6~9	30(3.1)	30(3.1)	>3.1	3~15(0.3~1.5)		2.0	20	10(1.0)	80(8.2)
有机硅玻璃漆布(2450)	0.20	±0.020	110(11.2)	11.2~23	70(7.1)	70(7.1)	7.1~12	35(3.6)	30(3.1)	>3.1	4~16(0.4~1.6)	—	2.5	20	20(2.0)	90(9.2)
	0.25	±0.025	120(12.2)	12.2~23	80(8.2)	80(8.2)	8.2~12	35(3.6)	30(3.1)	>3.1	5~20(0.5~2.0)		3.0	20	25(2.6)	120(12.2)
有机硅玻璃漆布(2451)	0.10	±0.010	70(7.1)	7.1~15	40(4.1)	40(4.1)		20(2.0)	20(2.0)	>2.0	25(2.6)		1.5	15	5(0.5)	50(5.1)
	0.12	±0.012	90(9.2)	9.2~16	50(5.1)	50(5.1)		25(2.6)	20(2.0)	>2.0	25(2.6)		1.5	15	6(0.6)	60(6.1)
	0.15	±0.015	100(10.2)	10.2~17	60(6.1)	60(6.1)	—	30(3.1)	20(2.0)	>2.0	30(3.1)	—	2.0	15	8(0.8)	75(7.7)
	0.18	±0.018	105(10.7)	10.7~18	65(6.6)	65(6.6)		30(3.1)	30(3.1)	>3.1	35(3.6)		2.0	20	10(1.0)	80(8.2)
	0.20	±0.020	110(11.2)	11.2~20	70(7.1)	70(7.1)		35(3.6)	30(3.1)	>3.1	40(4.1)		2.5	20	20(2.0)	90(9.2)
	0.25	±0.025	120(12.2)	12.2~21	80(8.2)	80(8.2)		35(3.6)	30(3.1)	>3.1	40(4.1)		3.0	20	25(2.6)	120(12.2)

产品名称	厚度(mm)	击穿电压(kV)									体积电阻率(Ω·cm)		
		常态时		常态弯折后	热态时		45°向伸长率为6%时		受潮后		常态时	热态时	受潮后
		标准值	实测值	实测值	标准值	实测值	标准值	实测值	标准值	实测值	实测值	实测值	实测值
油性玻璃漆布													
沥青醇酸玻璃漆布	0.10	5.0	5~9	3~4	2.5	2.5~6.0	3.0	>3.0	2.5	2.5~4.0			
醇酸玻璃漆布	0.12	6.0	6~9	3.5~4.5	3.0	3.0~7.0	3.0	>3.0	2.5	2.5~5.0			
聚酯玻璃漆布	0.15	7.0	7~9	4.0~5.5	3.5	3.5~7.5	4.0	>4.0	3.0	3.0~6.0	10^{12}~10^{14}	10^{10}~10^{12}	10^{10}~10^{13}
	0.18	7.5	7.5~10	5.0~6.0	3.8	3.8~8.0	4.5	>4.5	3.0	3.0~7.0			
	0.20	8.0	8~12	7.0~9.0	4.0	4.0~8.5	5.0	>5.0	3.0	3.0~7.0			
	0.25	9.0	9~13	8.0~10	4.5	4.5~10	6.0	>6.0	3.5	3.5~8.0			
有机硅漆布	0.10	5.0	5~9	1.8~7.0	2.0	2~5.0	2.5	>2.5	2.0	2~6.0			
	0.12	6.0	6~9	2~8.0	2.5	2.5~5.5	2.5	>2.5	2.2	2.2~6.0			
	0.15	7.0	7~11	2~9.0	3.0	3.0~6.0	3.5	>3.5	2.8	2.8~7.0	10^{14}~10^{16}	10^{11}~10^{12}	10^{13}~10^{15}
	0.18	7.5	7~12	2~10	3.0	3.0~9.0	3.5	>3.5	2.8	2.8~7.0			
	0.20	8.0	8~12	2~10	3.0	3.0~10	3.5	>3.5	2.8	2.8~9.0			
	0.25	9.0	9~13	2.2~10	3.5	3.5~10	3.5	>3.5	3.0	3.0~9.0			
硅橡胶玻璃漆布	0.11	1.5	1.5~2.4		1.0	1.0~1.6			0.8	0.8~1.3	10^{12}~10^{15}		10^{10}~10^{15}
	0.23	2.0	2.0~3.9		1.4	1.4~2.3			1.8	1.8~2.4			
聚酰亚胺玻璃漆布	0.10	2.5	2.5~15.3	2.0~3.5	1.5	1.5~5.0	--	—	1.5	1.5~2.2			
	0.15	5.5	3.5~5.8	3.8~4.7	3.5	3.5~5.1			5.0	5.0~5.3	10^{14}~10^{15}	10^{12}	10^{13}~10^{14}
	0.17	6.5	6.5~7.2	4.5~5.9	4.0	4.0~5.7			5.0	5.0~5.5			
	0.20	7.0	7.0~7.4	6.0~7.3	4.5	4.5~6.7			5.0	5.0~6.6			

表 1.3-5 漆布与浸渍漆的相容性·

浸渍漆 / 绝缘漆布	油性漆 石油溶剂	醇酸漆 苯类溶剂	酚醛醇酸漆 苯醇溶剂	三聚氰胺醇酸漆 苯、石油溶剂	环氧树脂漆 苯醇溶剂	聚酯漆 苯类溶剂	有机硅漆 苯类溶剂	聚酰亚胺漆 强极性溶剂
油性漆布	优	良	良	良	良	良	—	—
油性漆绸	优	良	良	良	良	良	—	—
油性玻璃漆布	优	良	良	良	良	良	—	—
沥青醇酸玻璃漆布	良	良	良	良	可	可	—	—
醇酸玻璃漆布	良	优	优	优	良	良	—	—
有机硅玻璃漆布	—	—	—	—	—	良	良	—
聚酰亚胺玻璃漆布							可	良

注 优>良>可。

1.3 绝缘漆布底材的性能

绝缘漆布所用的纺织布有平纹、斜纹和缎纹等。平纹布具有较高的机械强度，适于制造漆布和带；斜纹布抗撕裂强度高，伸长率大，适于做漆布带；漆布用棉布，应退浆、烧去绒毛，并经轧光处理；丝绸应在特殊溶液中煮炼去除丝胶，无碱玻璃布要求平整度好，疵点少，并应去除玻璃布的浸润剂，以提高上胶时的浸渍性。

常用纤维的综合性能见表 1.3-6。

表 1.3-6 常用纤维的综合性能

纤维名称	相对密度	含水率(%)	吸水率(%)	抗张力(N/mm)		伸长率(%)		扭曲强度	耐磨强度	耐酸性	耐碱性	抗菌性
				干	湿	干	湿					
绢丝	1.36	11	13	29～58.8	23.5～47	16～25	27～33	较强	较强	强	弱	弱
棉纤维	1.54	8.5	24～27	29～48	32～62	3～7	—	强	较强	弱	强	弱
玻璃纤维	2.56	0	0.3	61～67	53～57	3～4	25～35	最弱	最弱	强	较弱	强
涤纶纤维	1.38	0.4	0.5	45～49	45～49	19～23	19～23	强	强	强	强	强

2 浸渍纤维制品

2.1 漆(胶)布

2.1.1 D241 环氧玻璃上胶布

D241 环氧玻璃上胶布用(KH560)处理的无碱玻璃布浸以 F 级环氧树脂溶液，经加热烘焙而成的玻璃上胶布。

2.1.1.1 技术性能

(1)外观。上胶布应浸渍均匀、不得有严重胶道和皱折、不得有机械杂质、胶疙瘩和污物，相互之间不得粘接在一起。

(2)上胶布尺寸。上胶布应成卷供应，复卷时两端应整齐，紧密地卷于 ϕ76mm 的纸管芯上。

上胶布的树脂含量、挥发物含量，可溶性树脂含量应符合表 1.3-7 规定。

表 1.3-7 D241 环氧玻璃上胶布的树脂、挥发物、可溶性树脂含量

上胶布	树脂含量(%)	挥发物含量(%)	可溶性树脂含量(%)
底材 0.10mm×1000mm	45±5	≤2	≥85
底材 0.14mm×1000mm	45±5	≤2	≥85

2.1.1.2 产品特点

该上胶布固化成型后热态机械强度高。

2.1.1.3 适用范围和应用技术

适用于电机匝间绝缘、卷制层压管和压制其他 F 级异型绝缘零件。

预热阶段：温度 110～130℃，压力 2～15MPa，时间 40～90min。

热压阶段：温度 175～185℃，压力 15～20MPa，时间按制件厚度 15min/mm 计算，最低不少于 60min。

2.1.2 D293 高强度二苯醚玻璃上胶布

D293 高强度二苯醚玻璃上胶布用(KH560)处理的无碱玻璃布浸以高强度二苯醚树脂溶液，经加热烘焙而成的玻璃上胶布。

2.1.2.1 技术性能

(1)外观。上胶布应浸渍均匀、不得有严重胶道和皱折、不得有机械杂质、胶疙瘩和污物，相互之间不得粘接在一起。

(2)上胶布尺寸。上胶布应成卷供应，复卷时两端应整齐，紧密地卷于 ϕ76mm 的纸管芯上。

上胶布的树脂含量、挥发物含量，可溶性树脂含量应符合表 1.3-8 规定。

表 1.3-8 D293 高强度二苯醚玻璃上胶布的树脂、挥发物、可溶性树脂含量

上胶布	树脂含量(%)	挥发物含量(%)	可溶性树脂含量(%)
底材 0.10mm×1000mm	45±5	≤3	≥85
底材 0.14mm×1000mm	45±5	≤3	≥85

2.1.2.2 产品特点

该上胶布固化成型后具有较高的力学、电气性能。

2.1.2.3 适用范围和应用技术

适用于作 H 级电机匝间绝缘、卷制层压管和压制其他 F 级异型绝缘零件。

预热阶段：温度 130～150℃，压力 4～15MPa，时间 40～90min。

热压阶段：温度 190～200℃，压力 15～20MPa，时间按制件厚度 15min/mm 计算，最低不少于 60min。

后处理阶段：80℃，2h/100℃，12h/120℃，12h/140℃，24h/160℃，8h。

2.1.3 D294 无卤阻燃玻璃上胶布

D294 无卤阻燃玻璃上胶布用（KH560）处理的无碱玻璃布浸以无卤阻燃树脂溶液，经加热烘焙而成的玻璃上胶布。

2.1.3.1 技术性能

（1）外观。上胶布应浸渍均匀，不得有严重胶道和皱折，不得有机械杂质、胶疙瘩和污物，相互之间不得粘接在一起。

（2）上胶布尺寸。上胶布应成卷供应，复卷时两端应整齐，紧密地卷于 ϕ76mm 的纸管芯上。

上胶布的树脂含量、挥发物含量，可溶性树脂含量应符合表 1.3-9 规定。

表 1.3-9 D294 无卤阻燃玻璃上胶布的树脂、挥发物、可溶性树脂含量

上胶布	树脂含量(%)	挥发物含量(%)	可溶性树脂含量(%)
底材 0.10mm×1000mm	45±5	≤2	≥85
底材 0.14mm×1000mm	45±5	≤2	≥85

2.1.3.2 产品特点

该上胶布固化成型后热态机械强度极高，具有无卤阻燃特性。

2.1.3.3 适用范围和应用技术

适用于电机匝间绝缘、卷制层压管和压制其他 F 级异型绝缘零件。

预热阶段：温度 110～130℃，压力 2～15MPa，时间 40～ 90min。

热压阶段：温度 175～185℃，压力 15～20MPa，时间按制件厚度 15min/mm 计算，最低不少于 60min。

2.1.4　D291 聚酰胺—酰亚胺玻璃上胶布

D291 聚酰胺—酰亚胺玻璃上胶布用（KH560）处理的无碱玻璃布浸以聚酰胺—酰亚胺树脂溶液，经加热烘焙而成的玻璃上胶布。

2.1.4.1　技术性能

（1）外观。上胶布应浸渍均匀，不得有严重胶道和皱折，不得有机械杂质、胶疙瘩和污物，相互之间不得粘接在一起。

（2）上胶布尺寸。上胶布应成卷供应，复卷时两端应整齐，紧密地卷于 ϕ76mm 的纸管芯上。

上胶布的树脂含量、挥发物含量，可溶性树脂含量应符合表 1.3-10 规定。

表 1.3-10　D291 聚酰胺—酰亚胺玻璃上胶布的树脂、挥发物、可溶性树脂含量

上胶布	树脂含量（%）	挥发物含量（%）	可溶性树脂含量（%）
底材 0.10mm×1000mm	40±5	≤1.5	≥85
底材 0.14mm×1000mm	40±5	≤1.5	≥85

2.1.4.2　产品特点

该上胶布固化成型后具有优异的力学、电气性能和耐热性、耐辐射性能。

2.1.4.3　适用范围和应用技术

适用于 H 级电机匝间绝缘、卷制层压管和压制其他 H 级异型绝缘零件。

预热阶段：温度 130～150℃，压力 2～15MPa，时间 40～90min。

热压阶段：温度 220～230℃，压力 15～20MPa，时间按制件厚度 15min/mm 计算，最低不少于 60min。

2.2　预浸材料

F 级 DCC 耐热树脂预浸材料由聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料浸渍 F 级 B 阶段耐热树脂经烘焙而成，是 F 级变压器绝缘材料。

H 级 SCC 耐热树脂预浸材料由聚酰亚胺薄膜耐高温柔软复合材料浸渍 H 级 B 阶段耐热树脂经烘焙而成，是 H 级变压器绝缘材料。

2.2.1　物理性能

F 级 DCC 和 H 级 SCC 耐热树脂预浸材料的物理性能列于表 1.3-11。

表 1.3-11　F 级 DCC 和 H 级 SCC 耐热树脂预浸材料的物理性能

型　号	DCC 耐热树脂预浸材料				SCC 耐热树脂预浸材料		
	DCC—18	DCC—20	DCC—25	DCC—30	SCC—20	SCC—23	SCC—25
厚度（mm）	0.18	0.20	0.25	0.30	0.20	0.23	0.25
厚度允许偏差（mm）	±0.03				±0.03		
拉伸力（N/cm）	≥70	≥80	≥100	≥120	≥80	≥80	≥80
挥发物含量（%）	≤1.5						
可溶性树脂量（g/m^2）	≥45						
拉伸剪切强度（MPa）	≥3.0						
温度指数	≥155				≥180		
建议固化条件	130℃/5h						

2.2.2　电气性能

F 级 DCC 和 H 级 SCC 耐热树脂预浸材料的电气性能列于表 1.3-12。

表 1.3-12　F 级 DCC 和 H 级 SCC 耐热树脂预浸材料的电气性能

项目名称	DCC 耐热树脂预浸材料	SCC 耐热树脂预浸材料
击穿电压（标准条件下）（kV）	≥6.0	≥6.0
击穿电压（高湿条件下）	保留 90%	保留 90%
绝缘电阻（MΩ）	$>10^8$	$>10^8$

2.2.3　化学性能

F 级 DCC 和 H 级 SCC 耐热树脂预浸材料的化学性能列于表 1.3-13。

2.2.4　产品特点

F/H 级耐热树脂预浸材料是一种优良的绝缘材料，具有优良的机械强度、优良的电气性能、优良的耐热性、胶层柔软不脆裂、卷绕在导体上经热固化后可形成牢固的绝缘层，使用工艺简单等特点。

表 1.3-13　F 级 DCC 和 H 级 SCC 耐热树脂预浸材料的化学性能

项目名称	DCC 耐热树脂预浸材料	SCC 耐热树脂预浸材料
防水性	良好	良好
抗酸性	良好	良好
抗碱性	良好	良好
抗老化	良好	良好
光照及气候	无影响	无影响
对导体的腐蚀	无	无

（1）优良的耐热性。DCC 耐热树脂预浸材料产品热性能通过热重点斜法热老化试验，采用 200℃热老化测试，参照 GB/T 11026.1—2003、JB/T 1544—1999、JB/T 3730—1999 试验方法标准，产品失重 15%的温度为 368℃，失重 50%的温度为 414℃，测得产品温度指数为 157。

SCC 耐热树脂预浸材料产品热性能通过热重点斜法热老化试验，采用 240 度温度热老化测试，参照 GB/T 11026.1—2003、JB/T 1544—1999、JB/T 3730—1999 试验方法标准，产品失重 15%的温度为 390℃，失重 50%的温度为 504℃，测得产品温度指数为 190。

(2) 机械强度高，具有明显的抗冲击性。DCC/SCC 耐热树脂预浸材料中间分别采用聚酯薄膜/聚酰亚胺薄膜，薄膜具有优异的机械强度和抗冲击性，产品兼具薄膜的优异性能。

(3) 绝缘性能好。DCC/SCC 耐热树脂预浸材料兼具聚酯薄膜/聚酰亚胺薄膜优异的电气性能，确保产品具有良好的绝缘性能。

2.2.5 适用范围和应用技术

DCC/SCC 耐热树脂预浸材料适用于干式变压器箔式线圈的层间 F/H 级绝缘，以及其他需要热固化粘结的金属导体的耐热绝缘。产品的应用示例如图 1.3-1 和图 1.3-2 所示。

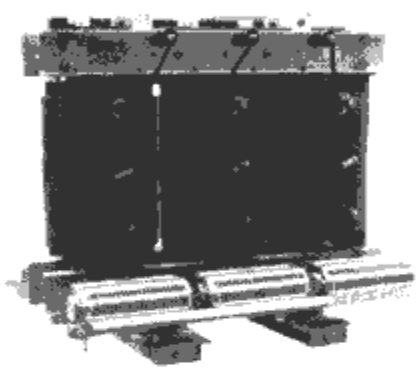


图 1.3-1 DCC 耐热树脂预浸材料应用（SCB 型干式变压器）

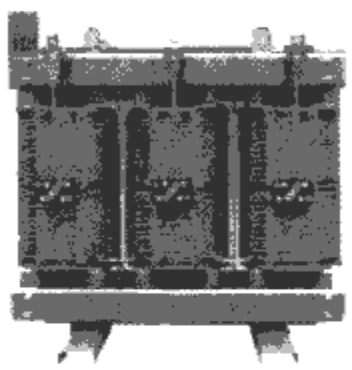


图 1.3-2 SCC 耐热树脂预浸材料应用（SGB 型干式变压器）

2.3 9658 上胶聚芳酰胺纤维（Nomex）纸

聚芳酰胺纤维（Nomex）纸由于其具有极佳的介电强度、机械特性、柔韧性和弹性，被广泛应用于许多电气绝缘领域中。以 Nomex 纸为基材的上胶聚芳酰胺纤维（Nomex）纸（以下简称上胶纸），其型号为 9658，底材 0.13mm。

9658 上胶聚芳酰胺纤维（Nomex）纸是以进口 Nomex 纸为底材，双面涂环氧胶粘剂经烘焙而成的。

2.3.1 物理及力学性能

聚芳酰胺纤维（Nomex）纸的物理及力学性能列于表 1.3-14。

表 1.3-14 聚芳酰胺纤维（Nomex）纸的物理及力学性能

指标名称	单位	试 验 值
外 观	—	胶粘剂分布均匀，不允许有外来杂质、粘连的现象
底材厚度	mm	0.13±0.01
宽度	mm	910±10
胶含量	%	22±3（匝间） 27±3（对地）
可溶性树脂含量	%	≥85
剪切强度	MPa	≥7（常态 23℃±2℃） ≥5（热态 155℃±2℃）

2.3.2 介电性能

聚芳酰胺纤维（Nomex）纸的介电性能列于表 1.3-15。

表 1.3-15 聚芳酰胺纤维（Nomex）纸的介电性能

指标名称	单位	试 验 值
电气强度	MV/m	≥21（匝间） ≥20（对地）

2.3.3 热性能

上胶纸的耐热等级为 F 级。

2.3.4 产品特点

上胶纸具有良好的电气强度及剪切强度。

2.3.5 适用范围和应用技术

上胶纸采用热压工艺，适用于大、中型交、直流电机及水电转子磁极匝间、机身绝缘结构上。

第4章 层压制品

由浸渍热固性或可固化树脂的片状纤维材料多层相叠，经加热加压粘结成型的硬质复合制品，称层压制品。层压制品可加工成各种绝缘和结构零部件，广泛应用于电机、变压器、高低压电器、电工仪表和电子设备中。

随着电气工业的发展，高绝缘性、高强度，耐高温和适应各种使用环境的层压制品相继出现，印制电路用的覆铜箔层压板也由于电子工业的需要迅速发展。我国电工和电子用层压制品是解放后逐步发展起来的。化学处理玻璃纤维布和棉纤维纸的应用，冷冲型酚醛纸板、热态高强度环氧玻璃布板、耐高温的二苯醚玻璃布板和聚胺酰亚胺玻璃布板以及自熄性覆铜箔层压板等品种的试制成功，标志着我国热固性层压制品已形成比较完整的系列。

层压制品的性能取决于基材和粘结剂以及成型工艺。按其组成、特性和耐热性，层压制品可分为：

(1) 有机基材层压制品。以木浆绝缘纸、棉纤维纸、棉布等为增强材料，长期使用温度可达120℃。

(2) 无机基材层压制品。以无碱玻璃纤维布、无碱玻璃纤维毡，石棉纸等为增强材料。长期使用温度为130～180℃，甚至可达更高温度，随粘结树脂而异。

层压制品按形状和用途分为层压板、层压管、层压棒和模制层压制品。印制电路用覆铜箔层压板和作为高压电器用电容式套管的胶纸电容套管芯，是两类特殊的层压制品。

本章重点介绍层压制品的品种、性能及其应用。电工产品对层压制品的性能要求很多，有从产品的结构尺寸、允许温升、电压等级提出的要求；有从使用环境条件提出的要求；还有从工艺（如机械加工性、敲打、浸烘、浸焊）提出的要求。实际上很难有一种层压制品能够满足所有的使用要求，因此，详细了解每一品种的特性，才能正确合理地选用。此外，本章还将介绍层压制品应用时的机械加工方法。

1 层压制品种类及其性能

1.1 有机基材层压板

有机基材层压板绝大多数以酚醛树脂为粘结剂。增强材料则有浸渍绝缘纸（由硫酸盐木浆造）、棉纤维纸、棉布、化学纤维布等。按材料组成和电气、力学性能分为若干品种。

1.1.1 有机基材层压板的种类

按照国家标准，有机基材层压板有12个品种，均与ISO 1642—1979（E）层压板规范中的型号相当（见表1.4-1）。

1.1.2 有机基材层压板性能

1.1.2.1 外观

边缘应切割整齐，无裂纹。表面平滑，无气泡、皱纹和麻眼。尽量没有其他缺陷如擦伤、压坑和颜色不均。允许有少量色斑。

1.1.2.2 尺寸

(1) 厚度及允许偏差。层压板标称厚度及允许偏差见表1.4-2。量具精度0.01mm，测量头直径6～8mm，作用于层压板的压力为10～20kPa。

表1.4-1 层压板品种

型号①	树脂	增强材料	性能特点	适用范围
PFCP1	酚醛	纤维素纤维纸	力学性能比其他PFCP型好，正常湿度下电性能差	机械用
PFCP2	酚醛	纤维素纤维纸	油中电气强度高，正常湿度空气中电气强度好	工频高电压用
PFCP3	酚醛	纤维素纤维纸	正常湿度下电性能好	电气和机械用
PFCP4	酚醛	纤维素纤维纸	高湿下电性能稳定性好	电气和电子用
PFCP5	酚醛	纤维素纤维纸	与PFCP4型相似，但限制燃烧性	电气和电子用
PFCP6	酚醛	纤维素纤维纸	高湿下电性能好	电气和机械用
PFCP7	酚醛	纤维素纤维纸	与PFCP1型相似，但在较低温度下冲孔性好	机械用
EPCP1	环氧	纤维素纤维纸	高湿下电性能稳定性好，限制燃烧性	电子用
PFCC1	酚醛	棉　布	粗棉布②制、力学性能好	机械用
PFCC2	酚醛	棉　布	粗棉布②制	机械和电气用
PFCC3	酚醛	棉　布	细棉布②制，机械加工性能较好	机械用，推荐作小零部件
PFCC4	酚醛	棉　布	细棉布②制，机械加工性能较好	机械和电气用，推荐作小零部件

① 型号由表示树脂的二字母和表示增强材料的二字母组成，后接顺序号表示特性或用途。树脂代号：PF—酚醛，EP—环氧，SI—有机硅；增强材料代号：CP—纤维素纸，CC—棉布，GC—玻璃布。

② 粗细棉布没有统一的划分标准，ISO1642提供的参考数值如下：

粗棉布单位面积质量大于130g/m²，织密小于或等于30根/cm；细棉布单位面积质量小于或等于13g/m²，织密大于30根/cm。

表 1.4-2 层压板标称厚度及允许偏差 mm

标称厚度	PFCP		EPCP	PFCC			
	1，2，3，4，6	5，7	1	1	2	3	4
0.4	±0.07	±0.07	±0.07	—	—	±0.12	—
0.5	±0.08	±0.08	±0.08	—	—	±0.13	±0.13
0.6	±0.09	±0.09	±0.09	—	—	±0.14	±0.14
0.8	±0.10	±0.10	±0.10	±0.19	±0.19	±0.15	±0.15
1.0	±0.12	±0.12	±0.12	±0.20	±0.20	±0.16	±0.16
1.2	±0.14	±0.14	±0.14	±0.22	±0.22	±0.17	±0.17
1.6	±0.16	±0.16	±0.16	±0.24	±0.24	±0.19	±0.1
2.0	±0.19	±0.19	±0.19	±0.26	±0.26	±0.21	±0.21
2.5	±0.22	±0.22	±0.22	±0.29	±0.29	±0.24	±0.24
3.0	±0.25	±0.25	±0.25	±0.31	±0.31	±0.26	±0.26
4.0	±0.30		±0.30	±0.36	±0.36	±0.32	±0.32
5.0	±0.34		±0.34	±0.42	±0.42	±0.36	±0.36
6.0	±0.37	—	±0.37	+0.92	±0.46	+0.80	±0.40
8.0	±0.47		±0.47	+1.10	±0.55	+0.98	±0.49
10.0	±0.55			+1.26	±0.63	+1.12	±0.56
12.0	±0.62			+1.40	±0.70	±1.28	±0.64
14.0	±0.69			+1.56	±0.78	+1.40	±0.70
16.0	±0.75	—	—	+1.70	±0.85	+1.52	±0.76
20.0	±0.88			+1.90	±0.95	+1.74	±0.87
25.0	±1.00			+2.20	±1.10	+2.04	±1.02
30.0	±1.15			+2.44	±1.22	+2.24	±1.12
35.0	±1.25			+2.68	±1.34	+2.48	±1.24
40.0	±1.35			+2.90	±1.45	+2.70	±1.35
45.0	±1.45			+3.10	±1.55	+2.90	±1.45
50.0	±1.55	—	—	+3.30	±1.65	+3.10	±1.55
60.0				+3.70		+3.50	
70.0				+4.00		+3.80	
80.0				+4.40		+4.20	
90.0				+4.70		+4.50	
100.0				+5.00		+4.80	

（2）宽度和长度。层压板宽度、长度和允许偏差见表 1.4-3。

表 1.4-3 层压板宽度、长度和允许偏差 mm

标称宽度和长度	允许偏差
450～1000	±15
1000 以上～2600	±25

1.1.2.3 翘曲

标称厚度 3mm 及以上的层压板，最大翘曲值见表 1.4-4。

表 1.4-4 层压板最大翘曲值 mm

厚 度	最大翘曲值	
	直尺长 1000	直尺长 500
3～6	10	2.5
6～8	8	2.0
大于 8	6	1.5

1.1.2.4 物理、力学和电性能

层压板物理、力学和电性能标准值见表 1.4-5～表 1.4-7，参考指标见表 1.4-10。

表 1.4-5 层压板物理、力学和电性能标准值

项 目	单位	受试板材厚度范围	PFCP1	PFCP2	PFCP3	PFCP4	PFCP5	PFCP6	PFCP7	EPCP1	PFCC1	PFCC2	PFaC3	PFCC4
垂直层向弯曲强度	MPa	最小 1.5mm	135	120	120	75	75	85	80	110	100	90	110	110
简支梁冲击强度（缺口试样、平行层向）	kJ/m²	最小 5mm	—	—	—	—	—	—	—	—	8.8	7.8	7.0	6.0
垂直层向耐电压（90℃油中 1min）	MV/m	最大 3mm	—	（见表 1.4-6）						（见表 1.4—6）	—	—	—	—
平行层向耐电压（90℃油中 1min）	kV	最小 3mm	—	40	20	25	—	25	—	20	—	15	—	20
平行层向绝缘电阻（浸水后）	Ω	最小 3mm	—	—	5.0×10^{7}	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^{9}	—	1.0×10^{10}	—	1.0×10^{7}	—	1.0×10^{7}

续表

项 目	单位	受试板材厚度范围	PFCP1	PFCP2	PFCP3	PFCP4	PFCP5	PFCP6	PFCP7	EPCP1	PFCC1	PFCC2	PFaC3	PFCC4
1MHz 相对介电常数（浸水后）	—	最大 3mm	—	—	—	5.5	5.5	6.0	—	5.0	—	—	—	—
1MHz 介质损耗因数（浸水后）	—	最大 3mm	—	—	—	0.05	0.05	0.055	—	0.05	—	—	—	—
50Hz 相对介电常数①	—	最大 3mm	—	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50Hz 介电损耗角因数①	—	最大 3mm	—	0.05										
可燃性	—	—	—	—	—	—	考虑中	—	—	考虑中	—	—	—	—
吸水性	mg	—	（见表 1.4-7）											

① 105℃空气中加热 96h 后。

表 1.4-6　　层压板垂直层向 90℃油中耐电压（1min）　　MV/m

厚度	PFCP			EPCP	厚度	PFCP			EPCP
(mm)	2①	3，4，5	6	1	(mm)	2①	3，4，5	6	1
0.4	19.0	15.7	17.5	19.0	1.6	14.3	10.1	10.0	14.3
0.5	18.2	14.7	16.0	18.2	1.8	13.9	9.6	9.5	13.9
0.6	17.6	14.0	15.0	17.6	2.0	13.6	9.3	9.1	13.6
0.7	17.1	13.4	14.1	17.1	2.2	13.4	9.0	8.7	13.4
0.8	16.6	12.9	13.4	16.6	2.4	13.3	8.8	8.4	13.3
0.9	16.2	12.5	12.8	16.2	2.5	13.3	8.7	8.3	13.3
1.0	15.8	12.1	12.3	15.8	2.6	13.2	8.6	8.2	13.2
1.2	15.2	11.4	11.4	15.2	2.8	13.0	8.5	7.9	13.0
1.4	14.7	10.7	10.6	14.7	3.0	13.0	8.4	7.7	13.0

① PFCP 2 型应在 105℃±5℃空气中热处理 96h 后测试。

表 1.4-7　　层压板吸水性　　mg

厚度	PFCP							EPCP	PFCC			
(mm)	1	2	3	4	5	6	7	1	1	2	3	4
0.4	410	165	160	44	44	62	410	30	—	—	186	125
0.5	417	167	162	45	45	63	417	31	—	—	190	127
0.6	423	168	163	45	45	65	423	31	—	—	194	129
0.8	437	173	167	47	47	67	437	33	201	133	201	133
1.0	450	180	170	48	48	69	450	35	206	136	206	136
1.2	460	188	174	50	50	71	460	37	211	139	211	139
1.6	480	204	182	53	53	76	480	41	220	145	220	145
2.0	500	220	190	56	56	80	500	45	229	151	229	151
2.5	525	240	195	59	59	85	525	50	239	157	239	157
3.0	550	260	200	63	63	90	550	55	249	162	249	162
4.0	600	300	220	70	—	100	—	60	262	169	262	169
5.0	650	342	235	77	—	110	—	68	275	175	275	175
6.0	700	382	250	84	—	118	—	76	284	182	284	182
8.0	810	470	285	99	—	135	—	90	301	195	301	195
10.0	920	550	320	113	—	149	—	—	319	209	319	209
12.0	1020	630	350	128	—	162	—	—	336	223	336	223
14.0	1130	720	390	142	—	175	—	—	354	236	354	236
16.0	1230	800	420	157	—	186	—	—	371	250	371	250
20.0	1440	970	490	186	—	202	—	—	406	277	406	277
25.0	1700	1150	570	222	—	219	—	—	450	311	450	311
22.5①	2040	1380	684	266	—	263	—	—	540	373	540	373

① 标称厚度大于 25mm 者均应单面加工成光滑的表面至 22.5mm。

1.1.3 非标准的品种

上 6075 酚醛层压纸板，具短时耐高温特性，冲孔性较好，表面无光泽，有利于碳膜附着，用于收音机、电视机和电子设备的电位器零件。厚度有 0.5、0.6、0.8mm 3 种。

上 3137H 三聚氰胺层压布板，具有良好的耐弧性，供制作高压少油断路器隔弧片。

副 10 支（副 58 号）粗棉布制造的酚醛层压布板，机械强度稍低于好棉布做的层压布板，厚度偏差也大一些。型号为 3025—1。可用作电机电器零部件和加工制造轧钢机轴瓦，以节约好棉布。另有纯棉非织布生产的酚醛层压板，性能亦相当于 3025—1。

酚醛尼龙布板其高湿下电性能优异，冲击强度高（NE-

MA 型号 N-1)。表层贴玻璃布的层压纸板（NEMA 型号 CEM-1），具自熄性。性能见表 1.4-8。

此外尚有酚醛桦木片层压板，现已很少使用。

表 1.4-8　　N—1 型和 CEM—1 型层压板性能指标

项　目	单　位	NEMA　N—1 型	NEMA CEM—1 型
弯曲强度（横向）	MPa	3 mm　66.8 13mm　59.8	1.6mm　196.8 —
吸水率	%	13mm 0.4 13mm 0.35	1.6mm　0.3 —
相对介电常数（1MHz，原始状态） 23℃浸水 24h 50℃浸水 48h	—	3mm　3.90　13mm　4.30 3mm　3.90　13mm　4.40 3mm　4.00　—	1.6mm　5.0 1.6mm　5.0 —
介质损耗因数（1 MHz，原始状态） 23℃，浸水 24h 50℃，浸水 48h	—	3mm　0.038　13mm　0.038 3mm　0.039　13mm　0.039 3mm　0.045　—	1.6mm　0.035 1.6mm　0.040 —
粘合强度（横向，原始状态） 50℃，浸水 48h	kN	4.54 4.54	— —
Izod 冲击强度（横向 50℃，浸水 48h）（缺口）	kJ/m²	10.7	—
平行层向击穿电压（原始状态） 50℃，浸水 48h	kV	60 40	45 40
耐燃性（垂直法）	—	—	0 级

1.1.4　有机基材层压板的应用

酚醛层压板机械强度高，耐湿性和耐热性优良，电性能良好，易加工，在电工产品中广泛应用。酚醛层压纸、布板密度约 1.35g/cm³，只有铝的 50%，在航空和其他结构中亦用得很多。

酚醛层压制品耐化学腐蚀性好，能耐有机溶剂、有机酸和稀的无机酸，适用于许多化工设备。一般不适用于碱性介质。

环氧纸板还具有受潮后电性能稳定与良好的阻燃性。贴玻璃布的纸板机械强度高并易于进行冲孔。

尼龙层压板适用于电子和高频设备中，具有高湿下优良的绝缘电阻，但该材料会流动和蠕变，需特殊处理，在设计时应予注意。

层压纸板能承受锯、钻、车、铣、刨等加工，加工后不应出现裂纹和掉渣。厚度在 3mm 以下的可冲孔加工，冷冲型的无须加热，一般型号需经预热后冲孔。

布板加工性能比纸板、玻璃布板好，粘合强度和冲击强度比纸板高，但吸水性大，吸湿后电绝缘性下降，且易长霉，不适用于湿热地区使用。

层压板的包装应能保证运输、搬运和储存时不受潮和不受损伤。国家标准以外的层压板性能指标见表 1.4-9。

表 1.4-9　　国家标准以外的层压板性能指标

指标名称	单位	指　标　值		
		上 6075	上 3137	3025—1
相对密度		—	—	1.3～1.42
吸水性	%	—	1.5	—
马丁耐热性(纵向)	℃	—	—	125
弯曲强度	MPa	—	—	90
拉伸强度	MPa	—	—	50
粘合强度	kN	—	—	5.5
抗劈力	kN	—	2.5	—
冲击强度	kJ/m²	—	(纵向) 15	20
热烘后翘度/(180℃，0.5h)	mm	不起泡，平翘度 15，对角翘度 10	—	—

续表

指标名称		单位	指　标　值		
			上 6075	上 3137	3025—1
表面电阻率	常态	Ω	10^8	10^{10}	—
	受潮后		—	10^8	—
体积电阻率	常态	Ω·cm	—	10^{10}	—
	受潮后		—	10^8	—
垂直层向电气强度	90℃油中	kV/mm	—	—	—
	厚度 0.5～1mm		—	4	4
	1.1～2mm		—	3.5	3
	2.1～3mm		—	2	2
	3mm 以上经一面加工		—	—	2
垂直层向击穿电压(20℃油中，厚 1mm)		kV	17	—	—
耐电弧性		s	—	15	—

1.2　无机基材层压板

我国无机基材层压板绝大多数以无碱玻璃布为增强材料，国外尚有少数采用玻璃纤维毡、玻璃纤维纸、石棉纸、石棉布和石棉毡的。无机基材与酚醛、环氧等树脂结合制成的层压板适用于 B 级、F 级电机电器；以有机硅、二苯醚等耐高温树脂制成的制品适用于 H 级电工产品。

1.2.1　无机基材层压板种类

按国家标准，有 7 种层压玻璃布板均与 ISO 1642—1979 (E) 层压板标准中的型号相当，另有 GB/T 1303.1—1998 中 3240 玻璃布板仍大量生产（见表 1.4-10）。

1.2.2　无机基材层压板性能

无机基材层压板参考指标表 1.4-11。

1.2.2.1　外观

玻璃布板边缘应切割整齐，外观要求与层压纸、布板相同。

1.2.2.2　尺寸

玻璃布板长度和宽度允许偏差同表 1.4-3，厚度见表 1.4-12。3240 板厚度见表 1.4-13。

1.2.2.3　翘曲

标称厚度 3mm 及以上的层压板，最大翘曲值见表 1.4-14。

1.2.2.4 物理、力学和电性能

玻璃布板物理、力学和电性能见表1.4-15，玻璃布板垂直板层90℃油中耐电压值见表1.4-16，玻璃布板吸水性见表1.4-17，参考指标见表1.4-18。

1.2.3 非标准品种

国内还生产表1.4-19中所列非标品种，3240板与非标品种性能指标比较见表1.4-20。

1.2.4 国外无机基材层压板

三聚氰胺玻璃布板MFGC1：机械强度高，耐电弧和抗漏电痕迹，具有限定的燃烧特性，用于机电产品中。

环氧玻璃纤维毡层压板：有普通型EPGM—1与自熄型EPGM—2两种。高温下机械强度好，高湿下电性优异。适用于机电产品。另有以玻璃纤维毡和无捻机纱玻璃布交替压制的环氧层压板EPGRM 1，高温下力学性能特好。

表面贴玻璃布的自熄性环氧非织玻璃纤维板：NEMA型号CEM—3，性能与EPGC2相似，室温下冲孔性好。

不饱和聚脂玻璃纤维毡层压板VPGM1，2，3：高湿下电性能稳定，适用于机电产品。有自熄型和抗漏电痕迹型。另有玻璃纤维毡和无捻粗纱玻璃布交替压制的聚酯层压板VPGRM 1，机械强度高。

酚醛石棉纸板、石棉布板和石棉毡板：ISO型号为PFAP 1、PFAC 1和PFAM 1，耐热性好；适用于机械产品。其中以酚醛石棉布板力学性能较好。

几种国外层压玻璃布板的性能、垂直板层90℃油中耐电压值、吸水性列于表1.4-21～表1.4-23。

1.2.5 无机基材层压板的应用

酚醛玻璃布板在较高温度下强度和电性好，用于电动机绝缘及其他用途。三聚氰胺玻璃布板机械强度高，具耐弧性和耐燃性，特别适用于船用电器。有机硅玻璃布板耐热性高达200℃，有特别低的介质损耗因数。

环氧玻璃布板主要用于室温下要求电性能很稳定的电子产品。EPGC1、EPGC2和3240热态机械强度低，使用时要注意。而EPGC3、EPGC4的热态强度高，在很大的温度范围内有良好的尺寸稳定性。

环氧玻璃布板可制成高度耐燃的，适用于要求耐燃性的导弹、宇宙飞船及电子设备。

玻璃布板硬度比纸布板高，加工时易磨损刀具，发热量大，需采用硬质合金刀是或碳化硅砂轮加工，加工后一般尚需涂漆，使加工表面防潮。

表1.4-10 层压玻璃压板品种

型号	树脂	增强材料	性能特点	适用范围	备注
PFGC1	酚醛	无碱玻璃布	正常湿度下机械强度高，电性能好	机械和电气用	相当于老型号3230
EPGC1	环氧		机械强度特高，高湿下电性能稳定	机械电气和电子用	3240性能与此相当
3240	环氧酚醛		与EPGC1相似	机械和电气用	
EPGC2	环氧		与EPGC1相似，具耐燃性	机械、电气和电子用	
EPGC3	环氧		与EPGC1相似，高温下机械强度高	机械、电气和电子用	
EPGC4	环氧		与EPGC3相似，具耐燃性	机械电气和电子用	
SIGC1	有机硅		干态下介电性特好，湿态下性能仍佳	电子和其他电气用	
SIGC2	有机硅		耐热性好	高温下机械和电气用	

表1.4-11 层压板参考指标

指标名称		单位	PFCP							EPCP	PFOC			
			1	2	3	4	5	6	7	1	1	2	3	4
悬臂梁（1zod）冲击强度①（缺口试样，平行层向） ≥		kJ/m²	—	—	—	—	—	—	—	—	10	6	6	5
平行层向电气强度①（90℃油中20s逐级升压） ≥		kV	—	40	20	25	—	25	—	20	—	15	—	20
弯曲弹性模量 ≥		MPa	7×10^3	7×10^3	7×10^3	7×10^3	7×10^3	7×10^3	7×10^3	6×10^3	7×10^3	7×10^3	7×10^3	7×10^3
拉伸强度 ≥		MPa	120	100	100	70	60	70	70	70	80	60	100	80
压缩强度 ≥		MPa	150	150	100	100	100	100	120	120	—	150	170	150
抗劈力 ≥		N	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2500	2500	2500	2500
简支梁冲击强度，缺口试样 ≥	平行层向	kJ/m²	5	4	4	2.5	2.5	2.5	2.5	2	10	10	12	11
	垂直板层向		15	15	10	5	5	5	4	—	15	15	15	15
简支梁冲击强度，无缺口试样 ≥		kJ/m²	20	20	15	8	8	8	7	3	30	20	35	30
相对介电常数，1MHz			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
相比电痕化指数（CTI）		V	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.	100	100
密度		g/cm³	1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～14	1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～1.4	1.3～1.4
温度指数		—	120	120	120	120	105	120	120	130	110	110	110	110

① 本表悬臂梁冲击强度和平行电气强度二项摘自ISO 1642—1979（E），其余各项摘自IEC 15C（Sweden）63，Jan. 1983。

表 1.4-12 玻璃布板标称厚度及允许偏差 mm

标称厚度	允许偏差	标称厚度	允许偏差
0.4	±0.10	8.0	0.72
0.5	±0.12	10.0	0.82
0.6	±0.13	12.0	0.94
0.8	±0.16	14.0	1.02
1.0	±0.18	16.0	1.12
1.2	±0.21	20.0	1.30
1.6	±0.24	25.0	1.50
2.0	±0.28	30.0	1.70
2.5	±0.33	35.0	1.95
3.0	±0.37	40.0	2.10
4.0	±0.45	45.0	2.30
5.0	±0.52	50.0	2.45
6.0	±0.60		

表 1.4-13 3240 板厚度 mm

标称厚度	允许偏差
2.5，3.0，3.5	±0.33
4.0，4.5	±0.38
5.0，5.5	±0.48
6.0，6.5	±0.58
7.0，8.0	±0.68
9.0，10.0	±0.80
11～15（相隔 1）	±1.00
16～20（相隔 1）	±1.30
21～30（相隔 1）	±1.50
32～40（相隔 2）	±2.00
42～50（相隔 2）	±2.20
52～60（相隔 2）	±2.50
65～80（相隔 5）	±2.80

注 STGC1，SIGC2 厚度范围周为 0.4～25mm。

表 1.4-14 玻璃布板最大翘曲值 mm

材料	厚度	最大翘曲值		材料	厚度	最大翘曲值	
		直尺长 1000	直尺长 500			直尺长 1000	直尺长 500
SIGC1 SIGC2	3～6 6～8 大于 8	15 12 10	4 3 2.5	其他型号	3～6 6～8 大于 8	10 8 6	2.5 2.0 1.5
3240	5～7 8～15 16～30	10 7 3	— — —				

表 1.4-15 玻璃布板物理、力学和电性能标准值

指 标 名 称	单位	受试板材厚度范围	PFGC1	EPGC1	EPGC2	EPGC3①	EPGC4①	SIGC1	SIGC2②
垂直层向弯曲强度 ≥	MPa	最小 1.5mm	140	340	340	340	340	90	120
简支梁（Charpy）冲击强度（缺口试样，平行板层向） ≥	kJ/m²	最小 5mm	25	37	37	37	37	20	25
垂直层向电气强度（90℃油中 1min） ≥	MV/m	最大 3mm	（见表 1.4.11～表 1.4.16）					—	—
平行层向耐电压（90℃油中 1min） ≥	kV	最小 3mm	20	35	35	35	35	30	25
平行层向绝缘电阻（浸水后） ≥	Ω	最小 3mm	1×10^8	5×10^{10}	5×10^{10}	5×10^{10}	5×10^{10}	1×10^8	1×10^8
1MHz 相对介电常数（浸水后） ≤	—	最大 3mm		5.5	5.5	5.5	5.5	4.5	6.0
1MHz 介质损耗因数(浸水后) ≤	—	最大 3mm		0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.07
可燃性	—	—	—	—	考虑中	—	考虑中	—	—
吸水性	mg	—	（见表 1.4.11～表 1.4.17）						

① 150℃±5℃空气中处理 1 h 后在 150℃±5℃测定弯曲强度，应不小于表中规定值的 50%。

② 180℃±5℃油中处理 1h 后，在 180℃±5℃测定弯曲强度，应不小于表中规定值的 40%。

表 1.4-16 玻璃布板垂直层向 90℃油中耐电压（1min） kV/mm

厚度	PFGC	EPGC
(mm)	1	1，2，3，4
0.4	10.8	16.9
0.5	10.2	16.1
0.6	9.7	15.6
0.7	9.3	15.2
0.8	9.0	14.8
0.9	87	14.5
1.0	8.4	14.2
1.2	8.0	13.7
1.4	7.7	13.2
1.6	7.5	12.8
1.8	7.3	12.4
2.0	7.1	12.1
2.2	7.0	11.9
2.4	6.9	11.7
2.5	6.8	11.6
2.6	6.7	11.6
2.8	6.6	11.5
3.0	6.5	11.5

表 1.4-17 玻璃布板吸水性 mg

厚 度	PFGC	EPGC	SIGC	
(mm)	1	1，2，3，4	1	2
0.4	107	17	7	28
0.5	110	17	7	29
0.6	114	17	8	30
0.8	121	18	8	31
1.0	128	18	9	32
1.2	136	18	9	33
1.6	152	19	10	35
2.0	168	20	11	36
2.5	188	21	12	38
3.0	208	22	13	40
4.0	249	23	15	45
5.0	289	25	17	50
6.0	330	27	19	55
8.0	411	31	23	65
10.0	491	34	27	75
12.0	570	38	31	85
14.0	652	41	35	95
16.0	723	45	39	105
20.0	895	52	47	125
25.0	1096	61	57	150
22.5①	1314	73	68	180

① 标称厚度大于 25mm 者，应单面加工成光滑的表面至 22.5mm。

表 1.4-18　　玻璃布板参考指标

指标名称	单位	PFGC	EPGC				SIGC	
		1	1	2	3	4	1	2
悬臂梁（Izod）冲击强度①（缺口试样，平行层向）≥	kJ/m²	30	40	40	40	40	21	27
平行板层电气强度①（90℃油中20s逐级升压） ≥	kV	20	35	35	35	35	30	2
弯曲弹性模量 ≥	MPa	1.2×10^4	1.8×10^4	1.8×10^4	1.8×10^4	1.8×10^4	1.2×10^4	1.2×10^4
拉伸强度 ≥	MPa	130	220	220	220	220	70	90
压缩强度 ≥	MPa	150	200	150	200	150	50	50
抗劈力 ≥	N	2000	3000	3000	3000	3000	1000	1000
简支梁冲击强度，缺口试样平行板层向 ≥	kJ/m²	40	50	50	50	50	40	40
简支梁冲击强度，无缺口试样 ≥	kJ/m²	50	100	100	100	100	40	40
50Hz介质损耗因数② ≤			0.05	0.05	0.05	0.05	—	0.05
1MHz相对介电常数 ≤		5	5	5	5	5	4	5
相比电痕化指数	V	100	180	180	180	180	440	440
密度	g/cm³	1.6～1.8	1.7～2.0	1.7～2.0	1.7～2.0	1.7～2.0	14～16	16～17
温度指数	—	130	130	155	130	155	180	180

① 本表悬臂梁冲击强度和平行板层电气强度两项摘自ISO 1642—1979（E），其余各项摘自IECTC 15：15C（Sweden）63，Jan. 1983。

② 105℃空气中加热96h。

表 1.4-19　　国家标准以外的玻璃布板品种

型号	名称	特点	用途
3232	酚醛玻璃布板	由化学处理玻璃布制成，力学电气性能比PFGC1好	电机槽楔等用，并可在潮湿环境使用
西3231	苯胺酚醛玻璃布板	电气性能较好，耐潮性比PFGC1好	可在潮湿环境和变压器油中使用
西330	高介质损耗酚醛玻璃布板	由中碱玻璃布制成，具高的介电系数	有特殊要求的通信设备结构件用
上3253	酚醛改性二甲苯玻璃布板	力学电气性能较好耐潮性和耐化学腐蚀性优良	可作F级配套材料，并可在潮湿和化学环境使用
上3255 西350	苯酚改性二苯醚 玻璃布板	电气机械强度高，耐化学腐蚀，并耐辐照	适用作H级配套材料
东D321	聚胺—酰亚胺玻璃布板	由顺丁烯二酸酐和二元胺合成树脂制成力学电气性能好，并耐辐照	适用作H级配套材料
西339	聚酰亚胺玻璃布板	高湿下力学性能特佳，价贵	要求耐高温的特殊电工产品用

表 1.4-20　　3240及国家标准以外的玻璃布板性能指标

指标名称	单位	3240 GB 1303—1977	3232 Q/D 263--1967	西3231	西330	上3253	上3255 西350	东D321	西339
厚度范围	mm	0.2～80	0.5～50	0.5～50	—	0.2～80	0.5～30	0.2～50	0.5～3
密度	g/mm³	1.7～1.9	—	0.5	1.5	1.7	— 1.7	1.8～2.2	1.7
吸水性	%	—	—	—	—	0.5	0.5	—	—
马丁耐热性	℃	200	—	150	—	250	250	280	—
抗弯强度（纵向）	MPa	350	200	250	80	300	350 300	350	180
拉伸强度（纵向）	MPa	300	—	200	—	250	300 200	—	—
粘合强度	kN	5.8	4.5	2.5	—	4.8	5.8 4.0	4.0	—
冲击强度（纵向）	kJ/m²	150	80	100	—	200	150 100	150	—
表面电阻	Ω								
常态		10^{13}	10^{11}	10^{12}	—	10^{13}	10^{13} 10^{13}	10^{12}	10^{14}
受潮后		—	—	—	—	10^{11}	— 10^{11}	—	10^{12}
浸水后		10^{11}	—	10^{10}	—	—	10^{11} —	—	(250℃) 10^{10}
水煮后		—	10^9	—	—	(155℃) 10^{11}	—(180℃)10^{11}	—	—

续表

指标名称	单位	3240 GB 1303—1977	3232 Q/D 263—1967	西 3231	西 330	上 3253	上 3255 西 350	东 D321	西 339
体积电阻率	Ω·cm								
常态		10^{13}	10^{11}	10^{12}	—	10^{13}	10^{13} 10^{13}	10^{13}	10^{13}
受潮后		—	—	—	—	10^{11}	— 10^{11}	—	10^{11}
浸水后		10^{11}	—	10^{10}	—	—	10^{11} —	—	(250℃)10^{10}
水煮后		—	10^{9}	—	—	(155℃) 10^{10}	(180℃) 10^{10}	(180℃)	—
						10^{11}	(180℃) 10^{11}	10^{11}	
绝缘电阻	Ω								
常态		10^{10}	10^{10}	10^{9}	—	—	—	—	—
浸水后		10^{8}	—	10^{7}	—	—	—	—	—
水煮后		—	10^{7}	—	—	—	—	—	—
相对介电常数,1MHz		—	—	—	7.5	—	—	—	3.3
介质损耗角正切,1MHz		0.05	—	—	0.045	—	(50Hz) 0.03 受潮后 0.2	0.05	0.01
垂直击穿强度(90℃油中)	kV/mm								
0.2～1mm		(20℃油中)22	18	22	—	18	20	22	(常态) 30
1.1～2mm		20	16	20	—	18	18 20	20	(受潮) 15
2.1～3mm		—	14	18	—	—	16	18	(250℃) 10
>3mm，经一面加工		18	—	—	—	—	—	—	—
垂直击穿强度(水煮后)	kV/mm								
0.2～1mm		—	16	—	—	12(155℃下)	— 15	14	—
1.1～2mm		—	14	—	—	12	— 15	12	
2.1～3mm		—	—	—	—	—	—	10	
>3mm，经一面加工		—	12	—	—	—	—	—	
平行击穿电压	kV								
90℃油中		30	25 (20℃油中)	30	—	20	22 —	—	—
水煮后		—	15	—	—	—	— —	—	—

表 1.4-21　　几种国外层压玻璃布板性能指标

指标名称	单位	MFGC1	EPGM1	CEM-3	UPGM1	UPGM2	UPGM3	UPGRM-1	PFAP1	PFAC1	PFAM1
厚度范围	mm	0.4～50	0.4～50	0.8～2.38	1.6～25	1.6～25	1.6～25	1.6～50	0.6～50	1.6～50	1.6～50
垂直层向弯曲强度	MPa	200	300	228	130	130	130	270	70	70	135
冲击强度（Charpy）	kJ/m²	25	50	—	50	50	50	50	2.9	6.9	9.8
垂直层向电气强度(90℃油中)	MV/m	见表 1.4-22	11.7	—	—	—	—	9	—	—	—
平行层向耐电压	kV	15	35	击穿 45	35	35	35	35	—	—	—
绝缘电阻	Ω	10^{7}	10^{10}	—	5×10^{8}	5×10^{8}	5×10^{8}	10^{8}	—	—	—
相对介电常数，1MHz	—	7	5	5.4	5	5	5	5	—	—	—
介质损耗因数，1MHz	—	—	(50Hz) 0.05	0.035	—	—	—	—	—	—	—
相比电痕化指数(CTI)	V	500	180	—	500	500	500	500	—	—	—
可燃性	级	在考虑中	—	V-0	—	考虑中	考虑中	—	—	—	—
吸水性	mg	见表 1.4-23	33 (4mm)	0.2%～0.5%	—	—	—	39	—	—	—
TI	—	130	155	—	130	130	130	155	—	—	—

注　本表摘自 ISO 1642 (E)；IEC 15C (Sweden) 63；NEMA LI1 (R1976)。

表 1.4-22　　几种国外层压玻璃布板层压玻璃布板垂直板层 90℃油中耐电压 (1min)　MV/m

厚　度	MFGC	EPGM	UPGM	UPGRM
(mm)	1	1	1，2，3	1
0.4	9.1	—	—	—
0.5	8.6	—	—	—
0.6	8.2	—	—	—
0.8	7.6	—	—	—

续表

厚　度	MFGC	EPGM	UPGM	UPGRM
(mm)	1	1	1，2，3	1
1.0	7.0	—	—	—
1.4	6.2	14.4	12.3	—
1.8	5.6	12.6	11.0	11.0
2.2	5.3	12.1	10.0	10.0
2.5	5.2	12.0	9.4	9.4

表 1.4-23 几种国外层压玻璃布板吸水性 mg

厚度 (mm)	MFGC	EPGM	UPGM	UPGRM	PFAP	PFAC	PFAM
	1	1	1,2,3	1	1	1	1
0.4	103	—	—	—	—	—	—
0.5	—	—	—	—	231	—	—
0.8	116	—	—	—	234	—	—
1.6	142	27	60	—	242	318	460
3	188	32	70	35	257	363	575
4	220	33	78	39	268	396	660
6	285	39	92	46	289	461	840
10	414	48	120	60	332	590	1190
20	738	74	195	97	437	913	2060
25	900	87	230	115	490	1075	2500
22.5①	1080	104	276	138	588	1290	3000

① 标称厚度大于 25mm 者均应单面加工成光滑的表面至 22.5mm。

2 层压板

在层压制品的生产、销售、使用过程中免不了要储存一定量的层压板，层压制品的储存方法有可能对其性能产生一定的影响，甚至会影响到今后的使用，因此在储存中要适当注意以下几点：

(1)应避光保存，否则，光照会引起产品颜色变化，并可能引起板材翘曲。

(2)不宜存放温度过高如超过 40℃潮湿或有腐蚀性气体的库房内，因为这样会引起板材性能下降，翘曲和变色。

(3)应平放，以防翘曲。

(4)注意定向特性。层压制品有纵、横两个方向，一般情况下纵向比横向优越(强度高翘曲度，尺寸变化小等)，特别是正方形的板储存时要保持方向一致性(注意制造厂的方向标志)。

2.1 酚醛层压纸板

酚醛层压纸板是由纤维素纤维纸或电工绝缘浸渍纸浸以酚醛树脂，经热压而成。

2.1.1 密度

表 1.4-24 是酚醛层压纸板的密度值。

表 1.4-24 酚醛层压纸板的密度值

指标名称	单位	指标值		
		3020	3021	3022
密度	g/cm^3	1.30～1.45		

2.1.2 电气性能

表 1.4-25 列示了酚醛层压纸板的电气性能。

表 1.4-25 酚醛层压纸板的电气性能

指标名称		单位	指标值		
			3020	3021	3022
平行层向绝缘电阻	常态	Ω	$\geqslant 1.0\times10^4$	$\geqslant 1.0\times10^3$	$\geqslant 1.0\times10^4$
	浸水 24h 后	Ω	$\geqslant 1.0\times10^2$	$\geqslant 1.0\times10^1$	$\geqslant 1.0\times10^2$
垂直层向介电强度(90℃±2℃变压器油中)	0.5～1.0mm	—	≥12.0	≥160	≥17.0
	1.0～2.0mm	—	≥11.0	≥15.0	≥16.0
	厚度大于3mm，单面加工到2.0mm±0.2mm	—	≥9.0	≥13.0	≥14.0
平行层向耐电压(90℃±2℃，变压器油中 5min)		kV	≥8.0	≥14.0	≥14.0

2.1.3 力学性能

表 1.4-26 列示了酚醛层压纸板的力学性能。

表 1.4-26 酚醛层压纸板的力学性能

指标名称	单位	指标值		
		3020	3021	3022
垂直层向弯曲强度(纵向)	MPa	≥98	≥117	≥117
拉伸强度(横向)	MPa	≥78	≥88	≥78
冲击强度(简支梁，无缺口，纵向)	kJ/m^2	≥11.8	≥14.7	≥11.8
粘合强度	N	≥3528	≥3136	≥3528

2.1.4 热性能

表 1.4-27 列示了酚醛层压纸板的热性能。

表 1.4-27 酚醛层压纸板的热性能

指标名称	单位	指标值		
		3020	3021	3022
马丁温度(纵向)	℃	≥125	≥115	≥125
长期耐热性	—	E级	A级	E级

2.1.5 产品特点

具有较好的介电性能、机械强度，良好的耐油性。酚醛层压纸板能承受锯、钻、车、铣、刨等加工，加工后不易出现裂纹和掉渣，厚度在 3mm 以下的可冲孔加工，冷冲型的无需加热，一般型号需经预热后冲孔。

2.1.6 适用范围和应用技术

适用于机械、电机、电器设备中作绝缘结构零部件，并可在变压器油中使用。

2.2 酚醛棉布层压板

酚醛层压布板是由棉布浸以酚醛树脂经热压而成。表 1.4-28 列示了酚醛层压布板的型号、应用范围与特性。

表 1.4-28 酚醛层压布板的型号、应用范围与特性

型号	应用范围与特性
3025	机械用(粗布)、电气性能差
3026	机械用(细布)、电气性能差
3027	机械及电气用(粗布)、电气性能差
3028	机械及电气用(细布)、电气性能差，推荐作小零部件(类似于 3026)

注 3025、3026、3027、3028 酚醛布板分别对应于 IEC 60 893-3-4 中 PFCC201、PFCC203、PFCC202、PFCC204。

2.2.1 物理性能

表 1.4-29 列示了酚醛层压布板的物理性能。

表 1.4-29 酚醛层压布板的物理性能

性能	单位	指标值			
		3025	3026	3027	3028
密度	g/cm^3	1.30～1.40			
吸水性(2mm 板)	mg	≤229	≤229	≤151	≤151

2.2.2 电气性能

表 1.4-30 列示了酚醛层压布板的电气性能。

表 1.4-30 酚醛层压布板的电气性能

性能	单位	指标值			
		3025	3026	3027	3028
垂直层向电气强度（90℃ ± 2℃ 油中，2mm 板为例）	MV/m	≥0.65	≥0.65	≥3.4	≥4.6
平行层向击穿电压（90℃±2℃油中）	kV	≥1	≥1	≥18	≥20
相对介电常数（48～62Hz 下）	—	—	—	≤5.5	≤5.5
浸水后绝缘电阻	Ω	$\geq 1.0\times10^6$	$\geq 1.0\times10^6$	$\geq 5.0\times10^7$	$\geq 5.0\times10^7$

2.2.3 力学性能

表 1.4-31 列示了酚醛层压布板的力学性能。

表 1.4-31 酚醛层压布板的力学性能

性能	单位	指标值			
		3025	3026	3027	3028
垂直层向弯曲强度	MPa	≥100	≥110	≥90	≥100
表观弯曲弹性模量	MPa	≥7000			
平行层向冲击强度（简支梁法，缺口试样）	kJ/m^2	≥8.8	≥7.0	≥7.8	≥6.0
平行层向冲击强度（悬臂梁法，缺口试样）	kJ/m^2	≥5.4	≥5.9	≥5.9	≥4.9

2.2.4 热性能

表 1.4-32 列示了酚醛层压布板的热性能。

表 1.4-32 酚醛层压布板的热性能

性能	指标值			
	3025	3026	3027	3028
长期耐热性	E 级			

2.2.5 产品特点

具有较高的力学性能，耐磨性较好，特别是粘合强度高，加工性能比纸板、玻璃布板好，粘合强度和冲击强度比纸板高，但吸水性大，吸湿后电绝缘性下降，且易长霉，不适于湿热地区使用。

2.2.6 适用范围和应用技术

一般用作低压电机电器的绝缘结构零部件，如垫圈、槽楔、螺杆等，也可作为耐磨机械零部件，并可在变压器油中使用。

2.3 玻璃布层压板

玻璃布板种类很多，其性能也随基体树脂的不同而各异，玻璃布板与其他层压板相比，具有更高的机械强度和耐热性，其耐热性可从 B 级（130℃）到 200 级（200℃）。玻璃布板由于具有多方面的优良性能，因此广泛用于电气、建筑、化工、电子、飞机、宇航、汽车、电机车和船舶等工业中。表 1.4-33 列出了常用的制备玻璃布层压板的基体树脂及其所制备的板材的耐热性和一般用途。

表 1.4-33 制备玻璃布层压板的常用基体树脂及其特性

树脂种类	特性
三聚氰胺	易着色和阻燃性好，耐电弧性优异，还具备较高的机械强度、介电性能和耐水性。耐热等级：E～B 级
环氧树脂树脂	优异的力学、电气性能，粘合性强，收缩率小，耐热性能良好，化学稳定性好。随着环氧树脂的种类以及固化剂的不同可以制成不同耐热等级的玻璃布层压板。耐热等级：B～H 级
聚胺—酰亚胺树脂	具有非常好的综合性能，特别是在 180℃以下具有优异的介电性能、力学性能、耐磨性、耐辐射性；还耐燃烧、耐腐蚀，高温下力学性能和介电性能保持率高。在 200℃下可短期使用。耐热等级：H 级
聚酰亚胺树脂	具有非常好的综合性能，特别是在（－200～＋260）℃高低温下具有突出的介电性能、力学性能、耐磨性、耐辐射性；还耐燃烧、耐腐蚀，特别是它在高温高辐射剂量下能长期保持其机力学能和介电性能，是现有很多耐高温聚合物所无法相比的。耐热等级：H 级或 200、220 级
二苯醚树脂	具有良好的耐高温、耐辐射、耐水性、耐磨性、耐化学药品性，力学电气性能优良。高温下机械强度保持率高。原材料来源广泛，成本低，具有较高的性能价格比。耐热等级：H 级
有机硅树脂	具有优异的耐高低温性、耐老化性以及良好的耐水性，电气性能优良。具有较好的力学性能。耐热等级：H 级
苯并噁嗪树脂	近年来开发的一种新型含 N 六元环结构耐热树脂体系，该类树脂在加热或催化剂存在下可发生开环聚合反应，生成含氮网状结构材料。该树脂同时还具有耐热性好、耐磨性、耐化学药品性优异，同时还具有无卤阻燃、电气绝缘性好、热态机械强度保持率高、尺寸稳定等特点。具有较高的性能价格比。耐热等级：F～H 级
氰酸酯树脂	力学电气性能优异，具有高耐热（长期耐热性 160～230℃）、低介质损耗因数的特点，同时还具有优异的耐辐射以及良好的耐水性、耐磨性、尺寸稳定性、耐化学药品性等特点。耐热等级：H 级或 200、220 级。

2.3.1 3240 环氧酚醛玻璃布层压板

3240 环氧酚醛玻璃布层压板是目前国内产量最大的电工绝缘层压制品，采用无碱玻璃纤维布为底材，浸以环氧酚醛树脂，经热压而成。

由于 3240 板中酚醛树脂占了相当大的比例（一般环氧酚醛比为 60∶40），在固化过程中有小分子放出，制备的板材孔隙率高，因此容易造成层压板电气性能的波动较大，吸水率较高，尤其是浸水后绝缘性能下降幅度较大。该技术为 20 世纪 50 年代从苏联引进的，随着我国电机、电器的发展和全球经济一体化的发展趋势，国内经济发展正逐步与国际接轨，电机、电器标准的国际化对环氧玻璃布层压板提出了新的要求。越来越多的企业按照 IEC 标准对环氧玻璃布层压板提出了新的要求，因此在《绝缘行业“十五”发展规划》中已明确提出了推广环氧玻璃布层压板替代 3240 的要求。

2.3.1.1 物理性能

表 1.4-34 列示了 3240 环氧酚醛玻璃布层压板的物理性能。

表 1.4-34 3240 环氧酚醛玻璃布层压板的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm^3	1.70～1.90
吸水率	%	≤0.8
耐油性（变压器油中，4h）	℃	130

2.3.1.2 电气性能

表 1.4-35 列示了 3240 环氧酚醛玻璃布层压板的电气性能。

表 1.4-35 3240 环氧酚醛玻璃布层压板的电气性能

指标名称		单位	指标值
表面电阻率	常态时	Ω	≥1.0×10^{13}
	浸水 24h 后		≥1.0×10^{11}
体积电阻率	常态时	Ω·m	≥1.0×10^{11}
	浸水 24h 后		≥1.0×10^{9}
平行层向绝缘电阻	常态时	Ω	≥1.0×10^{10}
	浸水 24h 后		≥5.0×10^{8}
垂直层向介电强度（90℃±2℃变压器油中）	0.5～1mm	MV/m	≥22
	1.1～3mm		≥20
平行层向击穿电压（90℃±2℃变压器油中）		kV	≥30
1MHz 介质损耗因数		—	≤0.04
1MHz 介电常数		—	≤5.5

2.3.1.3 力学性能

表 1.4-36 列示了 3240 环氧酚醛玻璃布层压板的力学性能。

表 1.4-36 3240 环氧酚醛玻璃布层压板的力学性能

指标名称		单位	指标值
垂直层向弯曲强度	纵向	MPa	≥350
	横向		≥290
表观弯曲弹性模量		MPa	≥7000
拉伸强度		MPa	≥300
冲击强度（简支梁法，无缺口试样，纵向）		kJ/m^2	≥200
粘合力		N	≥5600
平行层向剪切强度		MPa	≥30

2.3.1.4 热性能

表 1.4-37 列示了 3240 环氧酚醛玻璃布层压板的热性能。

表 1.4-37 3240 环氧酚醛玻璃布层压板的热性能

指标名称	指标值
长期耐热性	B级（≥130℃）

2.3.1.5 产品特点

3240 板具有较高的机械强度，良好的电气性能。

2.3.1.6 适用范围和应用技术

适用于电机、电器设备中作绝缘结构零部件，并可在变压器油中使用。

2.3.2 上 3242 环氧玻璃布层压板

上 3242 环氧玻璃布层压板是经化学处理的电工用无碱玻璃纤维布、双酚 A 环氧树脂和固化剂复合构成，经热压工艺处理而得到的层压制品。

2.3.2.1 主要性能指标

上 3242 环氧玻璃布层压板的主要性能指标列于表 1.4-38。

表 1.4-38 上 3242 环氧玻璃布层压板的主要性能指标

指标名称			单位	适合试验用的板材标称厚度（mm）	指标值
密度			g/cm^3	全部	1.7～1.9
吸水性			mg	全部	见表 1.3-39
垂直层向弯曲强度	23℃±2℃	纵向	MPa	≥1.6	≥340
	150℃±5℃	纵向			≥170
冲击强度（简支梁）	（无缺口）	纵向	kJ/m^2	≥5	≥147
		横向			≥98
	（缺口）	纵向			≥33
		横向			
粘合强度			N	≥10	≥6800
平行层向绝缘电阻	常态下		MΩ	全部	≥1.0×10^4
	浸水 24h±1h 后				≥1.0×10^2
垂直层向电气强度（于 90℃±2℃变压器油中）			MV/m	≤3	—
平行层向耐电压（于 90℃±2℃变压器油中，1 min）			kV	>3	≥35
介质损耗因数（浸水后，1 MHz）			—	≤3	≤0.04
介电常数（浸水后，1 MHz）			—	≤3	≤5.5

2.3.2.2 吸水性

上 3242 环氧玻璃布层压板的吸水性列于表 1.4-39。

表 1.4-39 上 3242 环氧玻璃布层压板的吸水性

厚度平均值（mm）	吸水性（mg）	厚度平均值（mm）	吸水性（mg）	厚度平均值（mm）	吸水性（mg）
0.4	≤17	2.0	≤20	10	≤34
0.5	≤17	2.5	≤21	12	≤38
0.6	≤17	3	≤22	14	≤41
0.8	≤18	4	≤23	16	≤46
1.0	≤18	5	≤25	20	≤52
1.2	≤18	6	≤27	25	≤61
1.6	≤19	8	≤31	单面加工至 22.5	≤73

2.3.2.3 垂直层向电气强度

上 3242 环氧玻璃布层压板的垂直层向电气强度列于表 1.4-40。

表 1.4-40 上 3242 环氧玻璃布层压板的垂直层向电气强度

平均厚度（mm）	电气强度（MV/m）	平均厚度（mm）	电气强度（MV/m）	平均厚度（mm）	电气强度（MV/m）
0.4	≥16.9	1.0	≥14.2	2.2	≥11.4
0.5	≥16.1	1.2	≥13.7	2.4	≥11.1
0.6	≥15.6	1.4	≥13.2	2.5	≥10.9
0.7	≥15.2	1.6	≥12.7	2.6	≥10.8
0.8	≥14.8	1.8	≥12.2	2.8	≥10.5
0.9	≥14.5	2.0	≥11.8	3.0	≥10.2

2.3.2.4 产品特点

上 3242 环氧玻璃布层压板是一种优良的绝缘材料，具有优良的 F 级耐温性能、优良的力学性能、绝缘性能、化学稳定性和耐湿热以及耐油性。本产品在 155℃的高温下有优良的力学强度。

2.3.2.5 适用范围和应用技术

由于上 3242 环氧玻璃布层压板在高温下优良的力学和电气性能，它适用于机械、电气及电子等产品。

2.3.3 3244-1 发电机槽内固定用波纹板

3244-1 由无碱玻璃布、环氧树脂和固化剂构成。先用玻璃布浸以环氧树脂和固化剂，然后烘干形成 B 阶上胶布，再在模具中热压而成。产品表面光滑均匀，没有外来杂质及裂缝、气泡、分层等现象，允许表面有少量色泽不均或缺胶现象，但必须保证符合各项性能要求，边缘应切割整齐。

3244-1 发电机槽内固定用波纹板的主要性能指标列于表 1.4-41。

表 1.4-41 3244-1 发电机槽内固定用波纹板的主要性能指标

指标名称	单位	指标值
厚度范围	mm	0.86～1.07
波峰高	mm	1.75～2.05
面积	mm^2	370mm×320mm
永久变形值	mm	≤0.20
压缩强度（压至 2/3 波峰高时）	N/mm^2	≥0.60

注 本产品作 30 万、60 万 kW 等发电机槽内固定用材料，高温下有一定的机械强度。

2.3.4 双马来酰亚胺层压板

双马来酰亚胺层压板是 20 世纪 60 年代开发的一类新型耐高温绝缘材料，由于该层压板在耐高温、耐辐射、机械强度，电绝缘性等方面具有较为突出的优异性能，所以各研究院（所）生产厂家相继对聚酰亚胺类薄膜、漆布、漆包线漆、浸渍漆、玻璃布层压板进行了研究试制。20 世纪 70 年代初，东方绝缘材料厂、哈尔滨绝缘材料厂、西安绝缘材料厂先后在实验室小批量生产出了双马来酰亚胺玻璃布层压板，80 年代双马来酰亚胺玻璃布板已形成工业化生产，但由于各生产厂均制定和执行企业标准，所以型号不完全统一，使品种和型号很多，这里只叙述两个型号，以之说明其大概性能和应用，型号和规格见表 1.4-42 所示。

表 1.4-42 双马来酰亚胺层压板型号和规格

型号	生产规格
357	0.2～50
XJ9334	0.2～50

357 双马来酰亚胺层压板是由经后处理玻璃布浸以双马来酰亚胺 4,4'－二胺基二苯甲烷在二甲基甲酰胺极性溶剂中反应制得的胶粘剂经上胶烘干热压而成。

XJ9334 双马来酰亚胺层压板是对 357 层压板所用胶粘剂进行改性，并采用沃兰处理玻璃布上胶烘干热压而成。

2.3.4.1 物理性能

双马来酰亚胺层压板的物理性能列于表 1.4-43。

表 1.4-43 双马来酰亚胺层压板的物理性能

指标名称		单位	试验值	
			357	XJ9334
密度		g/cm^3	1.80	1.83
尺寸		mm	950×1950	950×1950
垂直层向弯曲强度(纵向)	常态	MPa	420	450
	180℃±5℃		320	280
冲击强度（纵向）		kJ/m^2	70	70
粘合强度		N	5800	5900

2.3.4.2 介电性能

双马来酰亚胺层压板的介电性能列于表 1.4-44。

表 1.4-44 双马来酰亚胺层压板的介电性能

指标名称		单位	试验值	
			357	XJ9334
体积电阻率	常态	Ω·m	5.0×10^{12}	5.5×10^{13}
	浸水 24h		4.5×10^{10}	4.0×10^{11}
	180℃±2℃		2.5×10^{10}	4.0×10^{11}
表面电阻率	常态	Ω	5.0×10^{14}	2.5×10^{15}
	浸水 24h		5.0×10^{13}	1.5×10^{15}
	180℃±2℃		3.0×10^{12}	1.5×10^{13}
平行层向绝缘电阻	常态	Ω	2.0×10^{11}	3.0×10^{11}
	浸水 24h		2.5×10^{8}	7.0×10^{8}
垂直层向电气强度	90℃±2℃，变压器油中	MV/m	30	26
平行层向耐电压	90℃±2℃，变压器油中	kV	35	32
介质损耗因数		—	0.02	0.02

2.3.4.3 常规热老化性

常规热老化温度所得温度指数：357 板为 191；XJ9334 板为 185。

2.3.4.4 产品特点

双马来酰亚胺层压板是一种综合性能优良的绝缘材料，具有耐高低温性能，良好的力学性能和电绝缘性能，以及化学稳定性。由于固化后的层压板分子结构中含有一定量的 N 元素和约 50%左右的玻璃布，所以在燃烧时具有自熄性。

（1）优异的耐高低温性能。由于固化后 357 和 XJ9334 层压板分子结构中含有热稳定性高的芳环和酰亚胺环，使分子链具有较大的钢性，同时由于双马来酰亚胺的过量，大分子链之间尚有一定的交联键，这种结构不仅使玻璃布层压板具有较高的热稳定性，而且在高温下还有较好综合性能。常态老化温度指数达 191，电工行业通常作为结构材料在 180℃下长期使用，短期热稳定性可达 350℃以上。

（2）较好的力学性能。由于双马来酰亚胺中芳香型分子结构和来酰亚胺环与芳环之间则以仲胺基－NH－相连，赋予大分子链一定的韧性，同时通过对大分子链的部分分子结构进行改性，使 357 和 XJ9334 层压板在常态或高温表现出优异的力学性能和电性能。

（3）较好的化学稳定性。固化后的双马来酰亚胺层压板在低浓度的酸性介质、30%左右的碱性溶液，强极性溶剂、变压器油中浸泡 1000h，外观均无明显变化，表现出较好耐化学腐蚀性能和化学稳定性。

2.3.4.5 适用范围及应用技术

双马来酰亚胺层压板和改性双马来酰亚胺层压板适用于 H 级电机作槽契，结构件和在要求较高各种电器中做绝缘结构件，同时也可被广泛用于高压开关，大型变压器等输变电设备中。在其他工业领域的应用开发，也在进行之中。

2.3.5 EPGC 环氧玻璃布层压板

EPGC 系列环氧玻璃布板采用胺类固化剂固化环氧树脂的体系，是完全按照国际标准 IEC 60893-3-2“电工用热固性树脂工业硬质层压板规范”中的技术指标要求生产的产品。其特性分类和型号见表 1.4-45。

表 1.4-45 EPGC 系列环氧玻璃布板型号和特性分类

型 号	应用范围及特性分类	长期耐热性
EPGC201	机械、电器及电子用，中等温度下强度较高	B级
EPGC202	类似于 EPGC201，具有规定的阻燃性	B级
EPGC203	机械、电器及电子用，中等温度下强度极高	F级
EPGC204	类似于 EPGC203，具有规定的阻燃性	F级

2.3.5.1 物理性能

EPGC 系列环氧玻璃布板的物理性能列于表 1.4-46。

表 1.4-46 EPGC 系列环氧玻璃布板的物理性能

指标名称	单位	指标值			
		EPGC201	EPGC202	EPGC203	EPGC204
密 度	g/cm^3	1.70～1.90			
吸水性（2mm 板）	mg	≤20			
燃烧性（垂直法）	—	—	FV_0	—	FV_0

2.3.5.2 电气性能

EPGC 系列环氧玻璃布板的电气性能列于表 1.4-47。

表 1.4-47 EPGC 系列环氧玻璃布板的电气性能

指标名称	单位	指标值			
		EPGC201	EPGC202	EPGC203	EPGC204
垂直层向电气强度（90℃±2℃变压器油中，2mm 板）	MV/m	≥11.8			
平行层向击穿电压（90℃±2℃变压器油中）	kV	≥35			
介质损耗因数（1MHz）	—	≤0.04			
介电常数（1MHz）	—	≤5.5			
浸水后绝缘电阻浸水后	Ω	$\geq 5.0\times10^{10}$			

2.3.5.3 力学性能

EPGC 系列环氧玻璃布板的力学性能列于表 1.4-48。

表 1.4-48 EPGC 系列环氧玻璃布板的力学性能

指标名称		单位	指标值			
			EPGC201	EPGC202	EPGC203	EPGC204
垂直层向弯曲强度（纵向）	常态	MPa	≥340			
	155℃±2℃		—	—	≥170	≥170
表观弯曲弹性模量		MPa	≥24 000			
拉伸强度		MPa	≥300			
粘合力		N	≥7500			
平行层向冲击强度（简支梁法，缺口试样，纵向）		kJ/m^2	≥33			
平行层向剪切强度		MPa	≥30			

2.3.5.4 产品特点

它具有较高的机械强度，优异的电气性能，与 3240 相比该系列环氧玻璃布层压板具有以下特点：

（1）热态强度保持率高：中等温度或热态下机械强度高，热态强度保持率可达 50%以上。

（2）高湿度下电气性能稳定：浸水后的绝缘电阻可达 $10^{12}\sim10^{14}\Omega$。

（3）平行层向耐电压水平高：达 35kV 以上。

2.3.5.5 适用范围和应用技术

EPGC 系列环氧玻璃布板适用于电机、电器设备中作绝缘结构零部件，尤其是在高湿度、高电压、高强度要求的条件下使用，也可在变压器油中使用。

2.3.6 3248 高强度环氧玻璃布层压板

3248 环氧玻璃布层压板是为了满足大型发电机内对绝缘材料的要求而开发的。在 3242 环氧玻璃布层压板的基础上经过不断改进成为稳定而成熟的产品，产品由树脂的合成、上胶和压制 3 道工艺，经过严格的控制而制得。产品颜色为淡青色，层压板表面平整、无气泡、麻坑和皱纹。

2.3.6.1 物理性能

3248 环氧玻璃布层压板物理性能列于表 1.4-49，其吸水性列于表 1.4-50。

表 1.4-49 3248 环氧玻璃布层压板物理性能

指标名称	单位	适合试验用的板材标称厚度（mm）	指 标 值
密度	g/cm^3	全部	1.7～1.9
吸水性	mg	全部	见表 1.3-50

表 1.4-50 3248 环氧玻璃布层压板吸水性

厚度平均值（mm）	吸水性（mg）	厚度平均值（mm）	吸水性（mg）	厚度平均值（mm）	吸水性（mg）
0.4	≤17	2.0	≤20	10	≤34
0.5	≤17	2.5	≤21	12	≤38
0.6	≤17	3	≤22	14	≤41
0.8	≤18	4	≤23	16	≤46
1.0	≤18	5	≤25	20•	≤52
1.2	≤18	6	≤27	25	≤61
1.6	≤19	8	≤31	单面加工至 22.5	≤73

2.3.6.2 电气性能

3248 环氧玻璃布层压板电气性能列于表 1.4-51，垂直层向耐电压强度列于表 1.4-52。

表 1.4-51 3248 环氧玻璃布层压板电气性能

指标名称		单位	适合试验用的板材标称厚度（mm）	指标值
平行层向绝缘电阻	常态下	Ω	全部	$\geq1.0\times10^{12}$
	浸水 24h±1h 后			$\geq5.0\times10^{10}$
垂直层向电气强度（90℃±2℃变压器油中）		MV/m	≤3	见表 1.3-52
平行层向耐电压（90℃±2℃变压器油中，1min）		kV	>3	≥40
介质损耗因数（浸水后，1MHz 时）		—	≤3	≤0.04
介电常数（浸水后，1MHz 时）		—	≤3	≤5.5

表 1.4-52 3248 环氧玻璃布层压板垂直层向电气强度

平均厚度（mm）	电气强度（MV/m）	平均厚度（mm）	电气强度（MV/m）	平均厚度（mm）	电气强度（MV/m）
0.4	≥16.9	1.0	≥14.2	2.2	≥11.4
0.5	≥16.1	1.2	≥13.7	2.4	≥11.1
0.6	≥15.6	1.4	≥13.2	2.5	≥10.9
0.7	≥15.2	1.6	≥12.7	2.6	≥10.8
0.8	≥14.8	1.8	≥12.2	2.8	≥10.5
0.9	≥14.5	2.0	≥11.8	3.0	≥10.2

2.3.6.3 力学性能

3248环氧玻璃布层压板力学性能列于表1.4-53。

表1.4-53 3248环氧玻璃布层压板力学性能

指标名称			单位	适合试验用的板材标称厚度(mm)	指标值
垂直层向弯曲强度	23℃±2℃	纵向	MPa	≥1.6	≥360
		横向			≥340
	150℃±5℃	纵向			≥190
		横向			≥170
冲击强度	无缺口	纵向	kJ/m²	≥5	≥160
		横向			≥120
	(缺口)	纵向			≥37
		横向			
粘合强度			N	≥10	≥7200

2.3.6.4 产品特点

3248环氧玻璃布层压板是一种优良的绝缘材料，具有优良的F级耐温性能、优良的力学性能、绝缘性能、化学稳定性和耐湿热以及耐油性。产品在155℃的高温下有优良的机械强度。

2.3.6.5 适用范围和应用技术

3248环氧玻璃布层压板在高温下机械强度高，高湿下电气性能稳定性好。适用于大型发电机定子固定材料以及机械、电气及电子等产品。

2.3.7 无卤阻燃高强度玻璃布层压板

无卤阻燃高强度玻璃布层压板，是用经KH560处理的无碱玻璃布浸以F级苯并噁嗪树脂，经热压而成。本系列产品为国家“九五”重点科技攻关项目的科研成果。

2.3.7.1 物理性能

无卤阻燃高强度玻璃布层压板物理性能列于表1.4-54。

表1.4-54 无卤阻燃高强度玻璃布层压板物理性能

指标名称	单位	指标值		
		D327	D328	H级板
密度	g/cm³	1.70～1.90		
吸水性(2mm板)	mg	≤20		
可燃性	级	FV_1	FV_0	FV_0

2.3.7.2 电气性能

无卤阻燃高强度玻璃布层压板电气性能列于表1.4-55。

表1.4-55 无卤阻燃高强度玻璃布层压板电气性能

指标名称		单位	指标值		
			D327	D328	H级板
1MHz介质损耗因数		—	≤0.05		
1MHz介电常数		—	≤5.5		
体积电阻率	常态	Ω·m	≥1.0×10⁵		≥1.0×10⁵
	热态		≥1.0×10³ (155℃)		≥1.0×10³ (180℃)
平行层向耐电压(90℃±2℃变压器油中，1min)		kV	≥35		
垂直层向介电强度(90℃±2℃变压器油中，2mm板)		MV/m	≥18		

2.3.7.3 力学性能

无卤阻燃高强度玻璃布层压板力学性能列于表1.4-56。

表1.4-56 无卤阻燃高强度玻璃布层压板力学性能

指标名称		单位	指标值		
			D327	D328	H级板
垂直层向弯曲强度(纵向)	常态	MPa	≥400		
	热态		≥250 (155℃)		≥250 (180℃)
表观弯曲弹性模量(纵向)	常态	MPa	1.2×10⁴		1.2×10⁴
	热态		1.1×10⁴		1.1×10⁴
冲击强度(简支梁，缺口试样，纵向)		kJ/m²	≥37		
拉伸强度		MPa	≥300		
垂直层向压缩强度		MPa	≥500		
平行层向剪切强度		MPa	≥30		

2.3.7.4 热性能

无卤阻燃高强度玻璃布层压板热性能列于表1.4-57。

表1.4-57 无卤阻燃高强度玻璃布层压板热性能

指标名称	单位	指标值		
		D327	D328	H级板
长期耐热性	级	F		H

2.3.7.5 产品特点

无卤阻燃高强度玻璃布层压板具有优异的力学、电气性能，尤其是具有极高的热态机械强度保持率(达75%以上)和无卤阻燃特性，是一种环保新型材料，具有较高的性价比。

2.3.7.6 适用范围和应用技术

适用于F级电机、电器设备中作绝缘结构零部件。具有耐磨性好、硬度高的特点，也可用作耐磨结构零部件和其他机械零部件。

2.3.8 3253聚胺—酰亚胺玻璃布层压板

3253聚胺—酰亚胺玻璃布层压板，是用经KH560处理的无碱玻璃布浸以聚胺—酰亚胺树脂，经热压热处理而成的。

2.3.8.1 物理性能

3253聚胺—酰亚胺玻璃布层压板的物理性能列于表1.4-58。

表1.4-58 3253聚胺—酰亚胺玻璃布层压板的物理性能

指标名称	单位	指标值
吸水性(2mm板)	mg	≤32
可燃性	级	≥BH_2

2.3.8.2 电气性能

3253聚胺—酰亚胺玻璃布层压板的电气性能列于表1.4-59。

表1.4-59 3253聚胺—酰亚胺玻璃布层压板的电气性能

指标名称	单位	指标值
垂直层向耐电压(90℃±2℃变压器油中，1min)	kV	26 (2mm板)
平行层向耐电压(90℃±2℃变压器油中，1min)	kV	≥35
绝缘电阻(平行层向，浸水后)	Ω	≥1.0×10⁸
介质损耗因数(1MHz，浸水后)	—	≤0.03
相对介电常数(1MHz，浸水后)	—	≤5.5

2.3.8.3 力学性能

3253聚胺—酰亚胺玻璃布层压板的力学性能列于表1.4-60。

表1.4-60 3253聚胺—酰亚胺玻璃布层压板的力学性能

指标名称		单位	指标值
垂直层向弯曲强度（纵向）	常态下	MPa	≥400
	180℃±5℃		≥280
冲击强度（缺口试样，简支梁法，侧向试验）		kJ/m²	≥50

2.3.8.4 产品特点

3253层压板具有高的耐热性，优异的物理、力学性能及耐辐射性能，并可在200℃下短期使用。其综合性能是目前国内H级层压制品中最好的产品。

2.3.8.5 适用范围和应用技术

可用于H级电机、电器设备中作绝缘结构零部件。

2.3.9 二苯醚玻璃布层压板

二苯醚玻璃布层压板，是用经KH560处理的无碱玻璃布浸以高性能二苯醚树脂，经热压而成。

2.3.9.1 物理性能

二苯醚玻璃布层压板的物理性能列于表1.4-61。

表1.4-61 二苯醚玻璃布层压板的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm³	1.70～1.90
吸水性（2mm板）	mg	≤18

2.3.9.2 电气性能

二苯醚玻璃布层压板的电气性能列于表1.4-62。

表1.4-62 二苯醚玻璃布层压板的电气性能

指标名称		单位	指标值
垂直层向介电强度（90℃±2℃，变压器油中）	板厚0.5～1.0mm	MV/m	≥20
	板厚1.1～2.0mm		≥18
	板厚2.1～3.0mm		≥16
1MHz介质损耗因数		—	≤0.05
1MHz介电常数		—	≤5.5
浸水后绝缘电阻		Ω	≥1.0×10⁸
平行层向击穿电压（90℃±2℃，变压器油中）		kV	≥35

2.3.9.3 力学性能

二苯醚玻璃布层压板的力学性能列于表1.4-63。

表1.4-63 二苯醚玻璃布层压板的力学性能

指标名称		单位	指标值
垂直层向弯曲强度（纵向）	常态	MPa	≥500
	180℃±2℃		≥320
平行层向冲击强度（简支梁，缺口试样，纵向）		kJ/m²	≥42
平行层向剪切强度		MPa	≥28
拉伸强度		MPa	≥320

2.3.9.4 产品特点

二苯醚板耐热性好、力学电气性能优异，具有良好的耐高温、耐辐射、耐水性、耐磨性、耐化学药品性，具有较高的性能价格比。

2.3.9.5 适用范围和应用技术

适用于H级电机、电器设备中作绝缘结构零部件，对于在热态受力下机械强度要求较高的电机、电器设备中使用更为适宜。

2.3.10 C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板

C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板，是用经KH560处理的无碱玻璃布浸以双马型聚酰亚胺树脂，经热压而成，该产品为国家“八五”重点科技攻关项目的科研成果。

2.3.10.1 物理性能

C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板的物理性能列于表1.4-64。

表1.4-64 C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm³	1.70～1.90

2.3.10.2 电气性能

C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板的电气性能列于表1.4-65。

表1.4-65 C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板的电气性能

指标名称		单位	指标值
1MHz介电常数		—	≤5.5
1MHz介质损耗因数		—	≤0.03
平行层向绝缘电阻	常态	Ω	≥1.0×10¹⁰
	浸水后		≥1.0×10⁸
垂直层向介电强度（90℃±2℃，变压器油中）	0.5～1.0mm	MV/m	≥20
	1.1～2.0mm		≥18
	2.1～3.0mm		≥16

2.3.10.3 力学性能

C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板的力学性能列于表1.4-66。

表1.4-66 C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板的力学性能

指标名称		单位	指标值
垂直层向弯曲强度（纵向）	常态	MPa	≥400
	200℃±2℃		≥200
冲击强度（简支梁，无缺口试样，纵向）		kJ/m²	≥150

2.3.10.4 产品特点

C级双马型聚酰亚胺玻璃布层压板耐热性好、力学电气性能优异。

2.3.10.5 适用范围和应用技术

适用于200℃级电机、电器设备中作绝缘结构零部件，对于在热态受力下机械强度要求较高的电机、电器设备中使用更为适宜。

2.3.11 三聚氰胺玻璃布层压板

三聚氰胺玻璃布层压板是用电工无碱玻璃布浸以三聚氰胺甲醛树脂，经热压而成。

2.3.11.1 物理性能

三聚氰胺玻璃布层压板的物理性能列于表1.4-67。

表1.4-67 三聚氰胺玻璃布层压板的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm³	1.80～2.00
吸水率	%	≤3

2.3.11.2 电气性能

三聚氰胺玻璃布层压板的电气性能列于表 1.4-68。

表 1.4-68 三聚氰胺玻璃布层压板的电气性能

指标名称		单位	指标值
垂直层向介电强度（90℃±2℃，变压器油中）	0.5～1.0mm	MV/m	≥14.0
	1.1～2.0mm		≥12.0
	2.1～3.0mm		≥10.0
平行层向击穿电压（90℃±2℃，变压器油中）		kV	≥20
耐电弧性		s	≥180

2.3.11.3 力学性能

三聚氰胺玻璃布层压板的力学性能列于表 1.4-69。

表 1.4-69 三聚氰胺玻璃布层压板的力学性能

指标名称		单位	指标值
垂直层向弯曲强度	纵向	MPa	≥240
	横向		≥147
冲击强度（简支梁，无缺口试样）	纵向	kJ/m^2	≥118
	横向		≥98

2.3.11.4 产品特点

层压板具有较高的力学性能、电气性能及优异的耐电弧性。

2.3.11.5 适用范围和应用技术

适用于电气设备中作耐电弧绝缘结构零部件。

2.3.12 D330 环氧防电晕玻璃布层压板

环氧防电晕玻璃布层压板是采用无碱玻璃布浸以防电晕环氧树脂，经热压而成的玻璃布层压板。

2.3.12.1 主要性能

环氧防电晕玻璃布层压板的主要性能列于表 1.4-70。

表 1.4-70 环氧防电晕玻璃布层压板的主要性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm^3	≥1.6
垂直层向弯曲强度（纵向）	MPa	≥240
表面电阻率	Ω	10^3～10^6

2.3.12.2 产品特点

防电晕板具有较高的机械强度和较好的耐热性和一定的防电晕性能，耐热等级为 B 级。

2.3.12.3 适用范围和应用技术

适用于大、中型电机电器中作防电晕绝缘结构材料。

3 层压管

层压管是以合成树脂为粘合剂，片状材料为补强材料，经热卷、烘焙而成的管状材料，以区别用模压法制成的层压管、引拔成型管、斜绕成型管和真空浇铸法形成的管筒。按所用材料分为层压纸管、层压棉布管、层压玻璃布管等。层压管可进行车（包括车制螺纹）、铣、钻、锯等机械加工。层压管主要用作电气设备的绝缘套管和其他绝缘零部件以及轴环、轴套、垫圈等机械零部件，也可用作化工管道和低温设备、空分设备以及槽车等领域。

3.1 层压纸管

3520 酚醛层压纸管是 1956 年我国从苏联引进的产品，目前国内可根据用户的需要生产，供应各类内径（如 φ16～575mm）的层压纸管。3520 酚醛层压纸管是用 0.007mm 绝缘卷绕纸，单面浸以酚醛树脂，经烘焙、热卷压固化加工而成的热固性管状绝缘材料。

3.1.1 物理性能

3520 酚醛层压纸管的物理性能列于表 1.4-71。

表 1.4-71 3520 酚醛层压纸管的物理性能

指标名称	单位	试验值					
密度	kg/m^3	≥1.10×10^3					
壁厚	mm	1.5	3	5	7	10	13
吸水率	%	10	8	6	5	4	3
弯曲强度	MPa	≥50.0					
压缩强度	MPa	≥50.0					

3.1.2 介电性能

3520 酚醛层压纸管的介电性能列于表 1.4-72。

3.1.3 热性能

3520 酚醛层压纸管的热稳定性为 E 级（120℃）。

3.1.4 产品特点

3520 酚醛层压纸管具有干燥状态下良好的介电性能，可以做为电机、电气工业中的绝缘件。

3.1.5 适用范围和应用技术

3520 酚醛层压纸管适用于干燥环境和变压器油中做电气设备的绝缘结构零部件。

表 1.4-72 3520 酚醛层压纸管的介电性能

指标名称	单位	试验值	试验条件
垂直层向耐电压 壁厚 1.5～2.5mm 2.5～3.5mm 3.5～4.5mm 4.5～6mm 6～9mm	kV	 ≥8.5 ≥8.0 ≥7.0 ≥6.5 ≥6	90℃±2℃ 变压器油中， 耐压 5min
介质损耗因数	—	≤0.03	
平行层向耐电压	kV	≥25	90℃±2℃ 变压器油中， 耐压 5min
表面耐电压	kV	≥12	常态空气中， 耐压 1min

3.2 3526 酚醛层压棉布管

3526 酚醛层压布管是用煮练退浆棉布浸以酚醛树脂，经烘干、卷压、烘焙固化而成。

3.2.1 物理性能

3526 酚醛层压布管的物理性能列于表 1.4-73。

3.2.2 电气性能

3526 酚醛层压布管的电气性能列于表 1.4-74。

3.2.3 力学性能

3526 酚醛层压布管的力学性能列于表 1.4-75。

3.2.4 产品特点

3526 管具有高的经向拉伸强度，低的吸水性。

3.2.5 适用范围和应用技术

产品适用于机械强度要求高，以及承受多种机械加工的绝缘结构零部件。

表 1.4-73 3526 酚醛层压布管的物理性能

指标名称	单位	指标值	
		内径 6～25mm	内径≥26mm
密度	g/cm³	≥1.40	

表 1.4-74 3526 酚醛层压布管的电气性能

指标名称			单位	指标值	
				内径 6～25mm	内径≥26mm
体积电阻率	常态时		Ω·m	≥1.0×10¹⁰	
	浸水 24h 后			≥1.0×10⁸	
平行层向绝缘电阻	常态时		Ω	≥1.0×10¹⁰	
	浸水 24h 后			≥1.0×10⁷	
50Hz 介质损耗因数			—	≤0.030	
垂直层向耐电压（90℃±2℃变压器油中，5min）	壁厚	1.5mm	kV	≥7	≥12
		2.0mm		≥10	≥14
		2.5mm		≥13	≥16
		3.0mm		≥15	≥18
平行层向耐电压（室温变压器油中，5min）			kV	≥25	
表面耐电压（受潮后室温空气中，1min）			kV	≥12	

表 1.4-75 3526 酚醛层压布管的力学性能 MPa

指标名称	指标值	
	内径 6～25mm	内径≥26mm
弯曲强度	≥180	
压缩强度（轴向）	≥70	
剪切强度	≥15	

3.3 玻璃布层压管

3.3.1 D3640 环氧酚醛层压玻璃布管

D3640 环氧酚醛玻璃布层压管是用电工用无碱玻璃布浸以环氧酚醛树脂，经热卷烘焙而成。

3.3.1.1 物理性能

D3640 环氧酚醛玻璃布层压管的物理性能列于表 1.4-76。

表 1.4-76 D3640 环氧酚醛玻璃布层压管的物理性能 g/cm³

指标名称	指标值	
	内径 6～25mm	内径≥26mm
密度	≥1.40	

3.3.1.2 电气性能

D3640 环氧酚醛玻璃布层压管的电气性能列于表 1.4-77。

表 1.4-77 D3640 环氧酚醛玻璃布层压管的电气性能

指标名称			单位	指标值	
				内径 6～25mm	内径≥26mm
体积电阻率	常态时		Ω·m	≥1.0×10¹⁰	
	浸水 24h 后			≥1.0×10⁸	
平行层向绝缘电阻	常态时		Ω	≥1.0×10¹⁰	
	浸水 24h 后			≥1.0×10⁷	
50Hz 介质损耗因数			—	≤0.030	
垂直层向耐电压（90℃±2℃变压器油中，5min）	壁厚	1.5mm	kV	≥7	≥12
		2.0mm		≥10	≥14
		2.5mm		≥13	≥16
		3.0mm		≥15	≥18

续表

指标名称	单位	指标值	
		内径 6～25mm	内径≥26mm
平行层向耐电压（室温变压器油中，5min）	kV	≥25	
表面耐电压（受潮后，室温空气中 1min）	kV	≥12	

3.3.1.3 力学性能

D3640 环氧酚醛玻璃布层压管的力学性能列于表 1.4-78。

表 1.4-78 D3640 环氧酚醛玻璃布层压管的力学性能 MPa

指标名称	指标值	
	内径 6～25mm	内径≥26mm
弯曲强度	≥180	
压缩强度(轴向)	≥70	
剪切强度	≥15	

3.3.1.4 产品特点

3640 管结构致密，吸水性小，具有高的力学、耐热和介电性能。

3.3.1.5 适用范围和应用技术

产品适用于电器设备中作绝缘结构零部件，并可在潮湿环境和变压器油中使用。

3.3.2 D410 聚胺—酰亚胺层压玻璃布管

D410 聚胺—酰亚胺层压玻璃布管是用经 KH560(或 KH550)处理的电工用无碱玻璃纤维布浸以聚胺—酰亚胺树脂，经热卷烘焙而成。

3.3.2.1 物理性能

D410 聚胺—酰亚胺层压玻璃布管的物理性能列于表 1.4-79。

表 1.4-79 D410 聚胺—酰亚胺层压玻璃布管的物理性能 g/cm³

指标名称	指标值
密度	≥1.65

3.3.2.2 电气性能

D410 聚胺—酰亚胺层压玻璃布管的电气性能列于表 1.4-80。

表 1.4-80 D410 聚胺—酰亚胺层压玻璃布管的电气性能 kV

指标名称			指标值
垂直层向耐电压(室温变压器油中，5min)	壁厚(mm)	1.5	≥14
		2.0	≥16
		2.5	≥18
		3.0	≥20
平行层向耐电压(室温变压器油中，5min)			≥30
表面耐电压(受潮后，室温空气中，1min)			≥14

3.3.2.3 力学性能

D410 聚胺—酰亚胺层压玻璃布管的力学性能列于表 1.4-81。

表 1.4-81 D410 聚胺—酰亚胺层压玻璃布管的力学性能 MPa

指 标 名 称	指 标 值
弯曲强度	≥200
压缩强度	≥80
剪切强度	≥20

3.3.2.4 产品特点

D410管力学和介电性能高，并有良好的耐高温性能和耐辐射性能。

3.3.2.5 适用范围和应用技术

产品适于H级电机、电器设备中作绝缘结构零部件。

3.3.3 D411 高强度二苯醚层压玻璃布管

D411高强度二苯醚层压玻璃布管是用经KH560处理的电工用无碱玻璃纤维布浸以改性二苯醚树脂，经热卷烘焙而成。

3.3.3.1 物理性能

D411高强度二苯醚层压玻璃布管的物理性能列于表1.4-82。

3.3.3.2 电气性能

D411高强度二苯醚层压玻璃布管的电气性能列于表1.4-83。

3.3.3.3 力学性能

D411高强度二苯醚层压玻璃布管的力学性能列于表1.4-84。

表 1.4-82 D411 高强度二苯醚层压玻璃布管的物理性能

指标名称	单 位	指 标 值
密度	g/cm^3	1.6～1.75
吸水性	%	≤0.8

表 1.4-83 D411 高强度二苯醚层压玻璃布管的电气性能

指 标 名 称		单位	指标值
绝缘电阻		Ω	$\geq 1.0\times10^8$
介质损耗因数(50Hz，180℃±2℃)		—	≤0.5
垂直层向耐电压(90℃±2℃变压器油中，5min)	壁厚 2.0mm	kV	≥12
	壁厚 3.0mm		≥17

表 1.4-84 D411 高强度二苯醚层压玻璃布管的力学性能 MPa

指 标 名 称	指 标 值
弯曲强度	≥180
压缩强度（轴向）	≥80
剪切强度	≥8

3.3.3.4 产品特点

D411管具有较高的耐热性、耐辐射性能和机械、电气性能，高温时机械强度高，性价比高，在180℃工作环境下可以长期工作。

3.3.3.5 适用范围和应用技术

产品适于H级电机、电气设备和干式变压器中做绝缘结构零部件。

3.3.4 D3848、Z3848 绝热环氧玻璃钢层压管

低温专用绝热环氧玻璃钢层压管系采用电工用无碱玻璃纤维布浸以环氧树脂，经热卷烘焙而成。

3.3.4.1 物理性能

D3848、Z3848绝热环氧玻璃钢层压管的物理性能列于表1.4-85。

3.3.4.2 电气性能

D3848、Z3848绝热环氧玻璃钢层压管的电气性能列于表1.4-86。

表 1.4-85 D3848、Z3848 绝热环氧玻璃钢层压管的物理性能

指标名称		指 标 值			
		D3848		Z3848	
		20℃	−160℃	20℃	−160℃
密度（g/cm^3）		1.65～1.80		1.65～1.80	
导热系数	层向	0.46	0.36	0.45	0.35
	垂向	0.41	0.31	0.40	0.30
线膨胀系数	层向	23		26	
	垂向	55		65	

表 1.4-86 D3848、Z3848 绝热环氧玻璃钢层压管的电气性能

指标名称	指 标 值			
	D3848		Z3848	
	20℃	−160℃	20℃	−160℃
平行层向耐电压（室温变压器油中，5min）	≥25kV			
表面耐电压（受潮后，室温空气中，1min）	≥12kV			

3.3.4.3 力学性能

D3848、Z3848绝热环氧玻璃钢层压管的力学性能列于表1.4-87。

表 1.4-87 D3848、Z3848 绝热环氧玻璃钢层压管的力学性能

指标名称		单位	指 标 值			
			D3848		Z3848	
			20℃	−160℃	20℃	−160℃
压缩强度	层向	MPa	210	280	180	250
	垂向		300	400	250	350
拉伸强度	层向	MPa	25	35	20	25
	垂向		250	300	200	250
冲击强度	垂向	J/cm^2	25	35	20	25
层间剪切强度		MPa	30	40	25	35

3.3.4.4 热性能

D3848、Z3848绝热环氧玻璃钢层压管的热性能列于表1.4-88。

表 1.4-88 D3848、Z3848 绝热环氧玻璃钢层压管的热性能

指标名称	指 标 值			
	D3848		Z3848	
	20℃	−160℃	20℃	−160℃
长期耐热性	F级		B级	

3.3.4.5 产品特点

D3848、Z3848管结构致密，吸水性小，具有高的机械、耐热和介电性能，D3848、Z3848管导热率低、低温冲击性能优异。根据材料的不同分为D3848和Z3848两种型号。D3848机械强度高，耐热等级为F级；Z3848机械强度较高，耐温等级为B级。

3.3.4.6 适用范围和应用技术

产品适用于电气设备中做绝缘结构零部件，并可在潮湿环境和变压器油中使用，也适用于要求较高的低温设备及槽车。

3.3.5 9363长规格环氧层压玻璃布管

9363长规格环氧玻璃布管是20世纪80年代由我国研究开发出来，产品可根据用户需要制成长规格大直径的玻璃布管供应。

9363长规格环氧玻璃布管是由环氧树脂、酸酐及卞胺合成胶粘剂，由玻璃布带及胶粘剂经湿法缠绕，加热固化而成。胶粘剂中环氧树脂中的羟基使酸酐开环，然后进行脂化反应，卞胺存在下羟基和环氧基之间不进行醚化反应。这种胶粘剂黏度小，浸渍性好，而且固化物的介电、力学性能优良。玻璃布是沃兰处理玻璃布。

3.3.5.1 物理性能

9363长规格环氧玻璃布管的物理性能列于表1.4-89。

表1.4-89 9363长规格环氧玻璃布管的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	kg/m^3	$\geqslant 1.6\times10^3$
弯曲强度	MPa	≥180
剪切强度	MPa	≥25
压缩强度（轴向）	MPa	≥98

3.3.5.2 介电性能

9363长规格环氧玻璃布管的介电性能列于表1.4-90。

表1.4-90 9363长规格环氧玻璃布管的介电性能

指标名称	指标值	试验条件
平行层向耐电压（kV）	30（不闪络、不发热、不击穿）	于90℃±2℃变压器油中
介质损耗因数	≤0.005	50Hz

3.3.5.3 热性能

9363环氧玻璃布管的耐热等级为F级（155℃）。

3.3.5.4 产品特点

9363长规格环氧玻璃布管是优良的绝缘管状材料，可广泛应用在高压开关行业做绝缘拉杆支柱和套筒。具有优良的气密性、耐潮湿性、力学和介电性能以及良好的机械加工性能和耐热性能，具有优良介电性能和机械加工性能。

3.3.5.5 适用范围和应用技术

9363长规格环氧玻璃布管适用于做高压、超高压电气设备中的主绝缘筒、绝缘拉杆等。

3.3.6 9361长规格无碱玻璃布管

9361长规格无碱玻璃布管可根据用户需要制成长规格大直径的无碱玻璃布管，是由无碱玻璃布带及胶粘剂经湿法缠绕，远红外线加热固化而成。胶粘剂中环氧树脂、酸酐、及卞胺组成，其中酸酐做环氧树脂固化剂，卞胺做促进剂。这种胶粘剂黏度小，浸渍性好，而且固化物的介电、力学性能优良。

3.3.6.1 物理性能

9361长规格无碱玻璃布管的物理性能列于表1.4-91。

3.3.6.2 介电性能

9361长规格无碱玻璃布管的介电性能列于表1.4-92。

表1.4-91 9361长规格无碱玻璃布管的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	kg/m^3	$\geqslant 1.6\times10^3$
弯曲强度	MPa	≥180
剪切强度	MPa	≥25
压缩强度（轴向）	MPa	≥98

表1.4-92 9361长规格无碱玻璃布管的介电性能

指标名称	单位	指标值	试验条件
平行层向耐电压	kV	25（不闪络、不发热、不击穿）	于90℃±2℃变压器油中5min
介质损耗因数	—	≤0.005	50Hz
表面电阻率	Ω	$\geqslant 1.0\times10^{12}$	
体积电阻率	Ω·m	$\geqslant 1.0\times10^{11}$	

3.3.6.3 热性能

9361长规格无碱玻璃布管的耐热等级为F级（155℃）。

3.3.6.4 产品特点

9361长规格无碱玻璃布管是优良的绝缘管状材料，可广泛应用在中、高压电器做绝缘结构件。具有优良的气密性、耐潮湿性、力学和介电性能以及良好的机械加工性能和耐热性能。具有优良的介电性能和机械加工性能。

3.3.6.5 适用范围和应用技术

9361长规格无碱玻璃布管适用于做中、高压电气设备中的主绝缘筒，绝缘结构件。

3.3.7 9367系列环氧涤纶玻璃布管

9367系列环氧涤纶是为发展SF_6断路器的需要，于20世纪80年代由国内研究开发的，其主要性能达到瑞士micafil公司Resuweb—361及Cellpaek公司Cevolit2441及2481/1506真空浸胶聚脂管的水平，该管可根据用户需要制成长规格的供应。

9367长规格环氧涤纶玻璃布管是由环氧树脂、酸酐、及卞胺合成胶粘剂，这种胶粘剂浸渍涤纶布、沃兰处理玻璃布经湿法缠绕、远红外线加热固化而成。胶粘剂中环氧树脂的羟基使酸酐开环，然后进行脂化反应，卞胺做促进剂，这种胶粘剂浸渍性好，而且固化物的介电、力学性能优良，涤纶布做内外表面的防腐符合结构。

3.3.7.1 物理性能

9367长规格环氧涤纶玻璃布管的物理性能列于表1.4-93。

表1.4-93 9367长规格环氧涤纶玻璃布管的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	kg/m^3	$\geqslant 1.6\times10^3$
吸水率（常态20℃±5℃，浸水中浸30min）	%	≤0.2 ≤0.3
压缩强度（轴向）	MPa	≥100
弯曲强度	MPa	≥250
剪切强度	MPa	≥30

3.3.7.2 介电性能

9367长规格环氧涤纶玻璃布管的介电性能列于表1.4-94。

表1.4-94 9367长规格环氧涤纶玻璃布管的介电性能

指标名称	单位	指标值	试验条件
电气强度 垂直层向 平行层向	MV/m	≥15 ≥10	变压器油中壁厚2～3mm常温变压器油中
介质损耗因数	—	≤0.005	50Hz
表面电阻率	Ω	$\geqslant 1.0\times10^{14}$	
体积电阻率	Ω·m	$\geqslant 1.0\times10^{13}$	

3.3.7.3 耐化学性能

9367环氧涤纶玻璃布管材质结构本身具有耐受SF_6分

解物（氢氟酸）的能力。

3.3.7.4 热性能

9367 环氧涤纶玻璃布管的耐热等级为 F 级（155℃）。

3.3.7.5 产品特点

9367 环氧涤纶玻璃布管是优良的绝缘管状材料，可广泛应用于中高压开关，特别是应用在 SF_6 断路器上做绝缘拉杆和支柱，可在很短的绝缘距离内耐受高的电压而不被击穿，闪络放电，材料本身具备耐受 SF_6 分解物（氢氟酸）的腐蚀能力。

3.3.7.6 适用范围和应用技术

9367 环氧涤纶玻璃布管适用于做充 SF_6 气体高压电气设备绝缘件，做拉杆、支柱或是灭弧筒，耐热等级为 F 级。

3.3.8 H3640 环氧酚醛层压玻璃布管

H3640 环氧酚醛层压玻璃布管是 20 世纪 60 年代研究开发的。根据用户需要卷制成从内经 ϕ16～575mm 不等的各种规格的玻璃布管。

该产品是以电工用无碱玻璃纤维布为底材，浸涂环氧酚醛树脂，经烘焙、热卷、固化而成，其中酚醛树脂为环氧树脂的硬化剂，酚醛树脂的缩合物含有羟基与环氧基进行硬化反应。

3.3.8.1 物理性能

H3640 环氧酚醛层压玻璃布管的物理性能列于表 1.4-95。

表 1.4-95 H3640 环氧酚醛层压玻璃布管的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	kg/m^3	$\geqslant 1.40\times10^3$
弯曲强度	MPa	≥176.5
压缩强度	MPa	≥68.6
剪切强度	MPa	≥14.7

3.3.8.2 介电性能

H3640 环氧酚醛层压玻璃布管的介电性能列于表 1.4-96。

3.3.8.3 热性能

3640 环氧酚醛层压玻璃管的热稳定性为 B 级。

3.3.8.4 产品特点

3640 环氧酚醛层压玻璃管，具有高的力学、耐热、介电性能、好的耐药品性、耐潮湿性及成本低的特点。

3.3.8.5 适用范围和应用技术

3640 环氧酚醛层压玻璃管适用于电气工业中做高压绝缘结构材料，在宇航工业中做雷达、火箭、飞机等零部件，在航海事业中做声呐仪器的透声材料，在石油化工中做防腐蚀、耐溶剂的管道，在其他工业中亦被广泛的应用。

表 1.4-96 H3640 环氧酚醛层压玻璃布管的介电性能

指标名称	单位	指标值	试验条件
体积电阻率	Ω·m	$\geqslant 1.0\times10^{10}$ $\geqslant 1.0\times10^{8}$	常态 浸水后
平行层向绝缘电阻	Ω	$\geqslant 1.0\times10^{10}$ $\geqslant 1.0\times10^{8}$	常态 浸水后
垂直层向耐电压 壁厚：1.5mm 2.0mm 2.5mm 3.0mm	kV	内经 25mm 以上 ≥12 ≥14 ≥16 ≥18	于 90℃±2℃的变压器油中，耐电压 5min
垂直层向耐电压	kV	≥25	于 90℃±2℃的变压器油中，耐电压 5min

4 层压棒

层压棒是用上胶纸、上胶布经搓芯卷制热压而成的棒状材料，根据所用材料的不同，分为胶纸棒、胶布棒和玻璃布棒。主要用于电气设备中做绝缘结构零部件。

4.1 3721 酚醛层压布棒

3721 酚醛层压布棒是用棉布浸以酚醛树脂，经成型模具热压而成，其截面呈圆形。

4.1.1 物理性能

3721 酚醛层压布棒的物理性能列于表 1.4-97。

表 1.4-97 3721 酚醛层压布棒的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm^3	≥1.25
吸水率	%	≤1.0

4.1.2 电气性能

3721 酚醛层压布棒的电气性能列于表 1.4-98。

表 1.4-98 3721 酚醛层压布棒的电气性能

指标名称	单位	指标值
平行层向绝缘电阻	Ω	$\geqslant 1.0\times10^{8}$
平行层向击穿电压（20℃±2℃，变压器油中）	kV	≥10.0

4.1.3 力学性能

3721 酚醛层压布棒的力学性能列于表 1.4-99。

表 1.4-99 3721 酚醛层压布棒的力学性能 MPa

指标名称	指标值
弯曲强度	≥118
拉伸强度	≥80

4.1.4 产品特点

3721 棒具有较高的机械强度，耐油性好，可进行车（包括车制螺纹）、铣、钻、锯等机械加工。

4.1.5 适用范围和应用技术

适用于电气设备中做绝缘结构零部件，并可在变压器油中使用。

4.2 层压玻璃布棒

4.2.1 3840 环氧酚醛层压玻璃布棒

3840 环氧酚醛层压玻璃布棒是用电工无碱玻璃布浸以环氧酚醛树脂，经成型模具热压而成，其截面呈圆形。

4.2.1.1 物理性能

3840 环氧酚醛层压玻璃布棒的物理性能列于表1.4-100。

表 1.4-100 3840 环氧酚醛层压玻璃布棒的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm^3	1.75～2.00

4.2.1.2 电气性能

3840 环氧酚醛层压玻璃布棒的电气性能列于表1.4-101。

表 1.4-101 3840 环氧酚醛层压玻璃布棒的电气性能

指标名称		单位	指标值
平行层向绝缘电阻	常态	Ω	$\geqslant 1.0\times10^{10}$
	浸水 24h 后		$\geqslant 1.0\times10^{7}$
平行层向击穿电压（90℃±2℃变压器油中）		kV	≥15.0

4.2.1.3 力学性能

3840环氧酚醛层压玻璃布棒的力学性能列于表1.4-102。

表1.4-102 3840环氧酚醛层压玻璃布棒的力学性能 MPa

指标名称	单位	指标值
弯曲强度	MPa	≥350
拉伸强度	MPa	≥200

4.2.1.4 产品特点

3840棒有较高的机械强度、介电性能和良好的机械加工性，同时产品具有良好的耐油性。

4.2.1.5 适用范围和应用技术

适用于电器设备中做绝缘结构零部件，并可在潮湿环境条件下和变压器油中使用。

4.2.2 D470聚胺—酰亚胺层压玻璃布棒

4.2.2.1 物理性能

D470聚胺—酰亚胺层压玻璃布棒的物理性能列于表1.4-103。

表1.4-103 D470聚胺—酰亚胺层压玻璃布棒的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm^3	1.65～2.00

4.2.2.2 电气性能

D470聚胺—酰亚胺层压玻璃布棒的电气性能列于表1.4-104。

表1.4-104 D470聚胺—酰亚胺层压玻璃布棒的电气性能

指标名称		单位	指标值
平行层向绝缘电阻	常态	Ω	$\geqslant 1.0\times10^{10}$
	浸水24h后		$\geqslant 1.0\times10^{7}$
平行层向击穿电压（90℃±2℃变压器油中）		kV	≥15.0

4.2.2.3 力学性能

D470聚胺—酰亚胺层压玻璃布棒的力学性能列于表1.4-105。

表1.4-105 D470聚胺—酰亚胺层压玻璃布棒的力学性能 MPa

指标名称	指标值
弯曲强度	≥350
拉伸强度	≥200

4.2.2.4 产品特点

D470聚胺—酰亚胺层压玻璃布棒是用经KH560（或KH550）处理的电工用无碱玻璃纤维布浸以聚胺—酰亚胺树脂，经卷制热压而成。

4.2.2.5 适用范围和应用技术

D470棒具有优异的力学性能和介电性能，并有良好的耐高温性能和耐辐射性能，适于H级电机、电气设备中做绝缘结构零部件。

4.2.3 D471改性二苯醚层压玻璃布棒

D471改性二苯醚层压玻璃布棒是用经KH560处理的无碱玻璃布浸以改性聚二苯醚树脂，经成型模具热压而成的，其截面呈圆形。

4.2.3.1 物理性能

D471改性二苯醚层压玻璃布棒的物理性能列于表1.4-106。

表1.4-106 D471改性二苯醚层压玻璃布棒的物理性能

g/cm^3

指标名称	指标值
密度	1.75～2.00

4.2.3.2 电气性能

D471改性二苯醚层压玻璃布棒的电气性能列于表1.4-107。

表1.4-107 D471改性二苯醚层压玻璃布棒的电气性能

指标名称		单位	指标值
平行层向绝缘电阻	常态	Ω	$\geqslant 1.0\times10^{10}$
	浸水24h后		$\geqslant 1.0\times10^{7}$
平行层向击穿电压（90℃±2℃，变压器油中）		kV	≥20.0

4.2.3.3 力学性能

D471改性二苯醚层压玻璃布棒的力学性能列于表1.4-108。

表1.4-108 D471改性二苯醚层压玻璃布棒的力学性能

MPa

指标名称	指标值
弯曲强度	≥350
拉伸强度	≥200

4.2.3.4 产品特点

D471棒具有较高的力学性能和介电性能，并有良好的耐高温性能和耐辐射性能，在180℃工作环境下可以长期工作。

4.2.3.5 适用范围和应用技术

适用于H级电机、电气设备中做绝缘结构零部件。

第 5 章 电 工 塑 料

热固性电工塑料是由合成树脂、填料和其他添加剂组成的粉状或纤维状的成型材料。在一定的温度和压力下，可用模具加工固化成各种形状和规格的电气绝缘零部件。热固性塑料固化成形后，成为不溶不熔的固化物。

热固性塑料所用的树脂有 3 个特征：

(1) 合成树脂的原料组分的官能度要足以使树脂最终形成体形结构，或在塑料的组分中添加能生成体形结构的组分。

(2) 热固性树脂大多为缩聚反应，反应过程中有水等低分子物生成，同时也有反应速度很慢的解聚反应存在。因此热固性塑料固化成形要在高的压力下进行，以便消除低分子物对制品的不良影响。

(3) 从热固性树脂合成到塑料固化，其过程受一系列物理和化学因素的影响，如温度、触媒、反应物的当量比，反应基团浓度降低等。可利用这些因素来控制和改变化学反应，利用各个反应阶段中其产物具有明显的不同特征，来制定生产和应用的技术条件。

此外，高分子材料还可进行接枝和嵌段，以获得特定性能的新材料。

在选择热固性塑料使用的填料时，必须考虑 3 方面因素：

(1) 价格因素是应该在不影响塑料主要性能的前提下从经济性出发，尽量添加适量廉价的填料，例如瓷土、赭石、碳酸钙等填料，以降低塑料的成本。

(2) 工艺因素是塑料的生产和应用过程中，必须添加某一合适的填料后，才能适应某一特定的工艺要求。例如在聚酯料团中添加适量的二价金属的氧化物或氢氧化物，以改善料团的触变性能。

(3) 特性因素是为了使塑料获得某一专门特性，往往在塑料中添加某一特种填料，以便满足使用要求。例如：添加滑石粉以提高塑料的电气强度；添加二氧化硅、二氧化钛和氢氧化铝等以提高塑料的耐弧性；添加石棉以提高塑料的杨氏模数、抗震和耐磨性等。这是保证制品安全可靠的重要技术措施之一。

1 酚醛塑料

1.1 酚醛模压塑料

酚与醛在酸或碱触媒条件下制得酚醛树脂，加填料、改性剂等（酸触媒树脂并加交联剂），经过加工制成的塑性材料，称酚醛塑料，酚醛塑料经加热模压成型为塑料制品。由无碱玻璃纤维浸以改性酚醛树脂，经烘培而成的带状、束状、团状热固性模塑料。

产品分以下两个类型：

(1) 4330—1 属一般强度乱向玻璃纤维模塑料。玻璃纤维乱向，适用于模塑结构较复杂的结构部件。

(2) 4330—2 属高强度定向玻璃纤维模塑料。定向玻璃纤维，适用于模塑高机械强度的结构部件。

1.1.1 物理性能

酚醛塑料的物理性能列于表 1.5-1。

表 1.5-1 酚醛塑料的物理性能

指标名称		单位	指标值	
			4330—1	4330—2
外观		—	不得混有外来杂质，成型后制件表面应平整、光滑、无气泡、裂纹	
树脂含量		%	由供需双方商定	
挥发份含量	带状	%	—	3.5～6.5
	束状		—	3.0～6.0
	团状		4.0～8.5	—
可溶性树脂含量		%	待定	待定
密度		g/cm³	1.65～1.85	1.70～1.90
吸水性		mg	≤20	≤20

1.1.2 电气性能

酚醛塑料的电气性能列于表 1.5-2。

表 1.5-2 酚醛塑料的电气性能

指标名称	单位	指标值	
		4330—1	4330—2
表面电阻率	Ω	≥1.0×10^{12}	≥1.0×10^{12}
体积电阻率	Ω·m	≥1.0×10^{10}	≥1.0×10^{10}
介质损耗因数（1MHz）	—	≤0.04	≤0.04
相对介电常数（1MHz）	—	≤7	≤7
电气强度	MV/m	≥14.0	≥14.0

1.1.3 力学性能和热性能

酚醛塑料的力学性能和热性能列于表 1.5-3。

表 1.5-3 酚醛塑料的力学性能和热性能

指标名称	单位	指标值	
		4330—1	4330—2
弯曲强度	MPa	≥160	≥450
拉伸强度	MPa	≥80	≥300
冲击强度（简支梁无缺口）	kJ/m²	≥50	≥180
马丁温度	℃	≥280	≥280
耐热等级	级	B	B

1.1.4 产品特点

4330—1：模压成型后尺寸稳定，力学性能较高，介电性能优良，耐热等级为 B 级。

4330—2：模压成型后尺寸稳定，力学性能高，介电性能优异，耐热等级为 B 级。

酚醛塑料在 70%相对湿度下，尺度稳定性很高。

酚醛塑料的线膨胀系数为 (0.7～7) $\times10^{-5}℃^{-1}$，是金属的 1/10 左右。导热系数很小，只有 0.209～0.837W/（m·K），马丁温度为 120～260℃，燃烧速率极慢。

酚醛塑料抗冲击强度受温度的影响很大，10℃时的抗冲击强度比25℃时要低20%～30%。

酚醛塑料耐有机溶剂和弱酸，不耐强酸和强碱，弱碱有轻微的侵蚀作用。酚醛塑料的电气性能对温度和湿度很敏感，特别是相对湿度80%以上的气候条件。在户外的阳光下，照射半年到1年，表面光泽消失，树脂粉化，填料开始外露。所以酚醛塑料不耐热带的户外气候。40%树脂含量时，以木粉为填料的酚醛塑料，在湿热带户外，经过一个潮湿季节，表面起泡，长霉达3～4级。50%树脂含量时，经过3个潮湿季节，表面有轻微麻点，生霉只有2级，但表面仍有光泽。在酚醛塑料中添加1.8%～2.0%的各种杀菌剂，抑止霉菌生长的有效期只有6～12个月。

酚醛塑料的耐弧性差，但在电弧作用下，具有产气熄弧的能力，酚醛塑料的机械切削性能不好。

1.1.5 适用范围和应用技术

4330—1：适用于对机械性能、电气性能较高的电机、电气设备中做绝缘结构零部件，并适合于在潮湿环境中使用。

4330—2：适用于对机械性能、电气性能高的电机、电气设备中做绝缘结构零部件，并适于在潮湿环境中使用。

应用参考工艺：

压制温度：150～160℃。

单位压力：35～50MPa。

保压时间：1～2min/mm。

预热条件：110～120℃，5～10min，保压前可适当放气，视制件情况可考虑将料片剪短使用。

1.2 玻璃纤维增强酚醛注塑料

增强酚醛模塑料由于具有优良的耐高温蠕变性，良好的加工成型性和优良的阻燃性，广泛应用于电子电器、机电产品、家用电器等诸多领域。玻璃纤维增强酚醛注射料是以改性酚醛树脂为主体，以连续玻璃纤维或短切玻璃纤维、有机纤维等为增强材料，经双螺杆挤出机混炼挤出破碎得到的不规则颗粒材料。与目前常用的电工用玻璃纤维增强不饱和聚酯模塑料相比，玻璃纤维增强酚醛注射料具有优良的耐高温和耐湿热性，线性膨胀系数小，机械强度较高，可达到阻燃V—0级，遇火燃烧发烟量少，特别是与铜件的粘结性强。日本松下电工株式会社的试验数据表明，在180～220℃下连续处理200h后，玻璃纤维增强酚醛塑模料的机械强度下降小于20%，而玻璃纤维增强不饱和聚酯模塑料则下降超过60%。

1.2.1 主要性能

玻璃纤维增强酚醛注塑料的主要性能见表1.5-4。

表1.5-4 玻璃纤维增强酚醛注塑料主要性能

项目名称	单位	性能指标	
		PT—201	PT—202
密度	g/cm³	1.75～2.00	1.50～1.70
模塑收缩率	%	0.10～0.50	0.30～0.70
吸水率	%	≤0.20	≤0.30
简支梁无缺口冲击强度	kJ/m²	≥10.0	≥15.0
简支梁缺口冲击强度	kJ/m²	≥3.0	≥4.0
热变形温度	℃	≥210	≥180
弯曲强度	MPa	≥100	≥80

续表

项目名称	单位	性能指标	
		PT—201	PT—202
压缩强度	MPa	≥180	—
体积电阻率	Ω·m	$\geq 1.0\times10^{9}$	$\geq 1.0\times10^{9}$
表面电阻率	Ω	$\geq 1.0\times10^{10}$	$\geq 1.0\times10^{10}$
电气强度	MV/m	≥10.0	≥10.0
燃烧性（厚度3.2mm）	级	FV—0	—
耐电弧性	s	≥160	—

1.2.2 产品特点

玻璃纤维增强酚醛注塑料有如下特点：

（1）力学电气性能好，最适宜于耐高压、高绝缘等电气产品。

（2）耐蚀性较强，耐油性好。

（3）耐燃性能好，可达到美国UL—94V0级，着火时放出烟量少。

（4）耐热性能好，热变型温度极高（200～260℃）。

（5）耐湿热性能好，长时间暴露于在湿热环境中其力学性能下降很少。

（6）尺寸收缩稳定，精密度高，表面光滑美观，可采用注射成型、模压成型、传递成型。

1.2.3 产品应用

玻璃纤维增强酚醛注塑料主要用作各类电机换向器、电器开关转动轴、新型焊机耐温部件、军用电连接器绝缘体、汽车发动机部件、汽车油泵部件等。

2 氨基模塑料

氨基模塑料系以三聚氰胺甲醛树脂与石棉、精制棉、滑石粉等填料经混合热辊而成的热固性模塑料。

2.1 物理性能

氨基模塑料的物理性能列于表1.5-5。

表1.5-5 氨基模塑料的物理性能

指标名称	单位	指标值
密度	g/cm³	1.60～1.80
吸水性	mg	≤50

2.2 电气性能

氨基模塑料的电气性能列于表1.5-6。

表1.5-6 氨基模塑料的电气性能

指标名称	单位	指标值
介电强度	MV/m	≥12
耐电弧性	s	≥180
耐电痕化指数（PTV）	V	≥600

2.3 力学性能

氨基模塑料的力学性能列于表1.5-7。

表1.5-7 氨基模塑料的力学性能

指标名称	单位	指标值
冲击强度（简支梁）	kJ/m²	≥4.5
弯曲强度	MPa	≥70

2.4 热性能

氨基模塑料的热性能列于表 1.5-8。

表 1.5-8 氨基模塑料的热性能

指 标 名 称	单 位	指 标 值
负荷热变形温度	℃	≥145

2.5 工艺性能

氨基模塑料的工艺性能列于表 1.5-9。

表 1.5-9 氨基模塑料的工艺性能

指标名称	单 位	指标值
模塑收缩率	%	≤0.6
拉西格流动性	mm	130～180

2.6 产品特点

氨基模塑料具有优良的耐电弧性、耐漏电起痕性。

氨基模塑料的导热系数为 0.167～0.419W/（m·K），线膨胀系数为 $4\times10^{-5}℃^{-1}$。氨基模塑料不易燃烧，离火源后自行熄灭，没有滴落现象。在温湿度交变的情况下，重量和尺寸变化不大，尺寸稳定性强。耐酸、碱、盐和有机溶剂。

氨基模塑料，在湿热带户外气候条件下，初期颜色变黄，2～3 年后产生粉化。在户内气候条件下，2～3 年后，其耐弧性从原始的 114s 降到 2～3s（塑料中加 6%～7%脱脂棉增强），其他电性能下降较缓慢。

2.7 适用范围和应用技术

适于制造防爆电机电器、电动工具、高低压电器绝缘部件、灭弧罩及耐弧部件。

应用参考工艺：

压制温度：160～170℃。

单位压力：35～45MPa。

保压时间：1～2min/mm。

预热条件：110～120℃，5～10min，保压前可适当放气。

3 不饱和聚酯模塑料

3.1 不饱和聚酯团状模塑料

20 世纪 50 年代，不饱和聚酯团状模塑料（DMC 或 BMC）首先在英国提出并得到应用。随着科学技术的进步和发展，人们不断改善和克服 DMC 的不足。在 20 世纪 60 年代初，片状模塑料（SMC）在原联邦德国问世，拜耳公司首先实现了机械化、连续化生产不饱和聚酯塑料。之后在西欧、美国和日本相继投产。

我国的模塑料工业起始于 20 世纪 60 年代初，常州建材 253 厂引进了英国 Scott—Bader 公司的工艺和设备，主要应用于手糊玻璃钢制品。1985 年以来我国从英国、美国和日本引进 20 余条不饱和聚酯塑料的技术和机组。据不完全统计，目前我国不饱和聚酯塑料的年产量大约为 10 余万 t。

不饱和聚酯塑料，从量的角度看，主要由不饱和聚酯树脂与不饱和单体（烯类）、引发剂（过氧化物）、阻聚剂、填料及其他添加剂组成的复合材料。SMC 生产过程主要分为 4 个步聚：树脂糊的制备和上糊操作；粗纱的切割和沉降；粗纱的浸渍与 SMC 的收卷；熟化后存放。

不饱和聚酯树脂的合成系由不饱和二元酸或酸酐和二元醇制得。其反应式为

$$m\mathrm{HOOCRCOOH}+n\mathrm{HOOCCH{=}CHCOOH}+(m+n)\mathrm{HOR'OH}\rightleftharpoons[\mathrm{OCRCOOR'O}]_m—[\mathrm{OCCH{=}CHCOOR'O}]_n+(m+n)\mathrm{H_2O}$$

不饱和聚酯树酯是主链结构中含有酯基和双键的聚合物，在引发剂的作用下与不饱和单体的双键共聚。可固化为体型结构。

3.1.1 物理性能

不饱和聚酯团状模塑料的物理性能列于表 1.5-10。

3.1.2 介电性能

不饱和聚酯团状模塑料的介电性能列于表 1.5-11。

表 1.5-10 不饱和聚酯团状模塑料的物理性能

指标名称	单 位	指 标 值						
		SMC				DMC		
		9434	9434—1	9434—2	9434—3	9433	9433—1	9433—2
密度，≤	kg/m^3	1.85×10^3	1.90×10^3	1.95×10^3	1.85×10^3	1.90×10^3	1.95×10^3	1.95×10^3
吸水性，≤	%	0.15	—	0.20	0.15	0.15	0.20	0.15
模塑收缩率，≤	%	0.15	0.20	0.20	0.15	0.15	0.30	0.30
弯曲强度，≥	MPa	160	205	135	180	90	80	70
弯曲弹性模量，≥	GPa	9	12	8	12	9	9	8
冲击强度（简支梁，无缺口），≥	kJ/m^2	60	90	45	90	30	25	30
拉伸强度，≥	MPa	65	90	55	90	30	28	25

表 1.5-11 不饱和聚酯团状模塑料的介电性能

指 标 名 称	单 位	指 标 值						
		SMC				DMC		
		9434	9434—1	9434—2	9434—3	9433	9433—1	9433—2
绝缘电阻（浸水 24h），≥	Ω	1.0×10^{12}	—	1.0×10^{12}	1.0×10^{12}	1.0×10^{12}	1.0×10^{12}	1.0×10^{12}
电气强度（90℃油中），≥	MV/m	12	—	10	13	12	12	10
介质损耗因数（1MHz），≤	—	0.015	—	0.015	0.015	0.015	0.03	—
相对介电常数（1MHz），≤	—	4.5	—	—	4.5	4.5	4.8	—
耐电弧性（间歇式），≥	s	180	—	150	180	180	180	150
耐电痕化指数（PTI）	V	600	—	600	600	600	600	600

3.1.3 热性能

不饱和聚酯团状模塑料的热性能列于表1.5-12。

表1.5-12 不饱和聚酯团状模塑料的热性能

指标名称	单位	指标值						
		SMC				DMC		
		9434	9434—1	9434—2	9434—3	9433	9433—1	9433—2
热变形温度，≥	℃	240	—	220	240	240	220	220
燃烧性（FV法）	级	FV0	FV0	—	FV0	FV0	FV0	FV0
温度指数（TI），≥	—	155	155	150	155	155	155	150

3.1.4 产品特点

不饱和聚酯塑料由于其独具的价格、性能、效率的优势在新材料领域占有了重要的、不可替代的位置。

不饱和聚酯塑料与金属和传统塑料相比有良好的设计适应性，可以进行高集约化零件的设计；高精度的成型公差，可省去许多机械操作；良好的表面外观，满足非常特殊的要求、配方自由度高，可加快进入市场的速度；稳定性好并且在广泛的温度范围内保持良好的强度；显著的介电强度和耐漏电痕迹性；低的热导率、微波穿透性和良好的抗凹痕性；不熔不溶；阻燃和低的发烟密度；一定的耐腐蚀性和耐气候性；按单位体积计材料成本较低。

3.1.5 适用范围和应用技术

SMC/DMC的主要应用领域是电气应用、汽车工业和建筑、住宅等领域。

在电气领域中主要应用在水道、天燃（煤）气、电力系统等结合部的箱柜；各种自动断路器外壳；防水（路灯）灯罩；人造卫星接收电波的抛物面天线。

在汽车工业中主要应用在SMC轿车车身零件；SMC卡车零件；公交车辆的行李支架、门框立柱和窗框应用等。SMC在铁路车辆中的应用主要包括铁路车辆窗框、卫生间组件、座椅、茶几台面、车厢壁板与顶板等。

在建筑/住宅方面主要应用在浴缸和整体浴室、淋浴间、防水盘、带浴缸的洗涤场；组合式水箱；净化槽和其他诸如移动式厕所、电话亭、家庭用电梯间、家庭用水净化装置、各种座椅等。

3.2 不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料

以不饱和聚酯树脂为粘合剂，加入填料和添加剂配成糊料，连续涂于运动着的上下两层塑料薄膜上，中间夹以随机分切的短切玻璃纤维，经浸压后收卷，然后再经熟化而成的软片状热固性模塑料。

3.2.1 物理性能

不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的物理性能列于表1.5-13。

表1.5-13 不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的物理性能

指标名称	单位	指标值			
		4341	4343	D552—1	D552—2
密度	g/cm^3	1.65～1.90			
吸水性	mg	≤20	≤20		≤20
模塑收缩率	%	≤0.15	≤0.15		≤0.15

3.2.2 电气性能

不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的电气性能列于表1.5-14。

表1.5-14 不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的电气性能

指标名称		单位	指标值			
			4341	4343	D552—1	D552—2
绝缘电阻	常态	Ω	≥1.0×10^{13}		≥1.0×10^{13}	—
	浸水24h		≥1.0×10^{12}		≥1.0×10^{12}	—
电气强度（90℃变压器油中）		MV/m	≥12.0	≥12.0	≥12.0	—
耐电弧性		s	≥180	≥180	≥180	—
耐电痕化指数（PTI）		V	≥600	≥600	≥600	—

3.2.3 力学性能

不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的力学性能列于表1.5-15。

表1.5-15 不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的力学性能

指标名称	单位	指标值			
		4341	4343	D552—1	D552—2
冲击强度（简支梁、无缺口）	kJ/m^2	≥90	60	≥70	≥90
弯曲强度	MPa	≥170	150	≥160	≥180

3.2.4 热性能

不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的热性能列于表1.5-16。

表1.5-16 不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的热性能

指标名称	指标值			
	4341	4343	D552—1	D552—2
热变形温度(A法)	≥240	≥240	≥240	—

3.2.5 燃烧性能

不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的燃烧性列于表1.5-17。

表1.5-17 不饱和聚酯玻璃纤维片状模塑料的燃烧性

指标名称	指标值			
	4341	4343	D552—1	D552—2
燃烧性	FV0	FV0	FV0	—

3.2.6 产品特点

表1.5-18列示了不饱和聚酯塑料的主要特征。不饱和聚酯塑料呈玉白色，从透明到不透明，容易着色，硬度为M90～115，表面耐磨性高，可与玻璃媲美，和棉布的动摩擦系数为0.22。导热系数为0.209W/(m·K)，线膨胀系数为$(1\sim5)\times10^{-5}℃^{-1}$。

不饱和聚酯塑料除难燃型外，一般容易燃烧，燃烧速度为18～50mm/min，离火后能继续燃烧。耐弱酸、弱碱，不耐强酸和强碱。耐溶剂性差，但耐水性好。不饱和聚酯塑料在湿热带的户外气候作用下，初期泛黄，3年后粉化，填料外露。但耐湿热的户内气候。

3.2.7 适用范围和应用技术

不饱和聚酯塑料的适用范围列于表1.5-19。该类材料适

用的模压成型工艺参数为：压制温度 140～150℃，压力 10～15MPa，时间 50～60s/mm。

表 1.5-18 不饱和聚酯塑料的主要特征

型 号	特 征
4341	具有低收缩，力学性能较高，电气性能优良，阻燃，耐电弧，高耐电痕化指数，制品可在 155℃以下长期使用
4343	具有低收缩，力学性能高，电气性能优良，阻燃，耐电弧，高耐电痕化指数，制品可在 155℃以下长期使用
D552—1	具有低收缩，很高的力学性能，电气性能优良，阻燃，耐电弧，高耐电痕化指数，制品可在 155℃以下长期使用
D552—2	具有低轮廓，很高的力学性能

表 1.5-19 不饱和聚酯塑料的适用范围

型 号	适 用 范 围
4341	用于机械、电气强度要求高的电器、电机等电工产品的绝缘部件
4343	
D552—1	
D552—2	用于汽车、船舶、建筑、卫生洁具等领域的结构部件和表面质量要求高的装饰品，能达到 A 级表面

3.3 9801 不饱和聚酯玻璃纤维模塑板

1961 年，片状模塑料(Sheet Molding Compound，SMC)在法国问世，利用这种技术可制出大幅面表面光洁、尺寸、形状稳定的制品，如汽车、船的壳体以及卫生洁具等大型制件，从而扩大了树脂基复合材料的应用领域。我国于 1962 年引进不饱和聚酯树脂用于军事上，20 世纪 70 年代以后逐渐转向民用。

9801 不饱和聚酯玻璃纤维模塑板是以不饱和聚酯玻璃纤维模塑料为原料，经热压固化成型等工艺加工而成的。适用于高低压开关、仪表、水箱及汽车等领域做绝缘板、结构件、壳体等。

3.3.1 物理性能

9801 不饱和聚酯玻璃纤维模塑板的物理性能列于表 1.5-20。

表 1.5-20 9801 不饱和聚酯玻璃纤维模塑板的物理性能

指标名称	单位	标称厚度 (mm)	指标值
吸水性，≤	mg	1	18
		2	20
		3	22
		4	23
		5	25
		6	27
		7	29
		8	31
		9	33
		10	35
		11～12	38
		13～14	41
		15～16	45
		17～20	52
		21～25	61
		26 以上	73
热变形温度，≥		℃	240
弯曲强度，≥		MPa	147
冲击强度（简支梁法），≥		kJ/m^2	55

3.3.2 介电性能

9801 不饱和聚酯玻璃纤维模塑板的介电性能列于表 1.5-21。

表 1.5-21 9801 不饱和聚酯玻璃纤维模塑板的介电性能

指 标 名 称	单 位	试验值
介电强度（采用连续均匀升压法，≥）	MV/m	9
绝缘电阻（浸水 24h，≥）	Ω	1.0×10^{12}
耐电弧性，≥	s	180
耐电痕化指数	V	600
可燃性	级	FV-0
工频耐电压（FV 法）	kV/min	5mm 厚模塑板，施以工频电压 42kV 历时 5min，应不出现击穿现象

3.3.3 产品特点

9801 板与同类产品比，具有优越的电气绝缘性、良好的阻燃性、耐电弧性及耐电痕性、高超的机械强度、卓越的耐湿耐潮性、耐腐蚀性及可靠的尺寸稳定性等优异性能。

3.3.4 适用范围和应用技术

9801 板主要用于以下几个方面：

(1) 汽车工业和交通运输部门：制造汽车的壳体和耐冲击部件，以及火车窗框、座椅等一些复杂的构件。

(2) 建筑工业：制造建筑嵌板、门窗框架、住宅组合水箱、浴缸和各种卫生用具。

(3) 电器工业：各种路灯的灯罩、防腐防爆和水下灯罩、电话电缆外壳、各种电子仪器和计算机的外壳。

(4) 化学工业：制造各种耐腐蚀容器、过滤器、污水槽等化工设备。

(5) 日常生活用品：压制家具、安全帽、电焊面罩、盘子、杯子、碗等。

3.4 干式不饱和聚酯模塑料

干式不饱和聚酯模塑料是随着电工电器产品的技术发展需求，在不饱和聚酯模塑料大类中发展起来的一类新材料。是由不饱和聚酯树脂，添加各种助剂、填料、颜料，经过炼塑挤出造粒制得的规则或不规则颗粒状塑料。干式不饱和聚酯模塑料除具有优异的电气性能、耐热、阻燃、高相对耐电痕化指数（CTI 值）、高耐电弧等特点外，与 BMC、SMC 塑料相比，突出的优点是其室温下的储存期在 1 年以上，不需要特殊的储存条件，能在普通的热固性注射机上全自动化成型，适合于制造电器产品中结构复杂、精度高、技术性能要求高的绝缘结构部件。20 世纪 80 年代桂林电器科学研究所成功研制出了干式不饱和聚酯模塑料，并于 90 年代初实现了规模生产。

3.4.1 主要性能

干式不饱和聚酯塑料的理化及电气性能见表 1.5-22。

3.4.2 产品特点

不饱和聚酯塑料有如下特点：

(1) 电气绝缘性好，最适宜于耐高压，高绝缘等级电气产品。

(2) 耐蚀性较强，适用于各种工程标本及隔热板等地方。

表 1.5-22 干式不饱和聚酯模塑料主要性能及用途

性能指标		单位		干式不饱和聚酯模塑料			
				UP—100	PT—310	PT—610	MU—100
密度		g/cm³	—	1.9～2.1	1.9～2.1	≤1.85	1.75～1.85
吸水性		mg	≤	25	20	≤0.1%	30
收缩率		%	—	0.5～0.8	0.4～0.8	0.4～0.9	0.9～1.3
弯曲强度		MPa	≥	70	75	60	70
简支梁冲击强度	有缺口	kJ/m²	≥	2.0	2.5	—	2.5
	无缺口	kJ/m²	≥	6.0	6.0	5.0	7.5
热变形温度		℃	≥	200	210	210	160
绝缘电阻		Ω	≥	—	—	—	—
表面电阻率		Ω	≥	1.0×10^{12}	1.0×10^{13}	1.0×10^{14}	1.0×10^{13}
体积电阻率		Ω·m	≥	1.0×10^{10}	1.0×10^{11}	1.0×10^{12}	1.0×10^{11}
电气强度（连续升压）		MV/m	≥	12		13.0	13
相比电痕化指数（CTI）		V	≥	600		500	600
耐电弧性		s	≥	180		—	180
燃烧性（UL94）		级	—	V—0	V—0	—	V—0
产品特性、用途		成型方法		模压、传递、注射		传、注	模、注
		特性和用途		力学电气性能要求较高的场合		电连接器等	壳体、触头支持等

（3）耐燃性能好，可达到美国 UL—94V0 级。

（4）耐热性能热变型温度极高（200～260℃）。

（5）内含玻璃纤维，其力学性能均优于一般热塑性工程塑料。

（6）任何颜色均可调制，不用再烤漆，颜色鲜艳逼真。

（7）尺寸收缩稳定，精密度高，表面光滑美观。可采用注射成型机、模压成型机、多工位转盘注射成型等设备来加工。

3.4.3 适用范围和应用技术

干式不饱和聚酯模塑料 UP—100 主要用于新型汽车点火系统绝缘部件、开关外壳，洗衣机等控制器件及接线端子的绝缘结构部件，低压电器、小型电机、防爆电器等产品的绝缘结构部件。UP—100 塑料及其制品如图 1.5-1 所示。

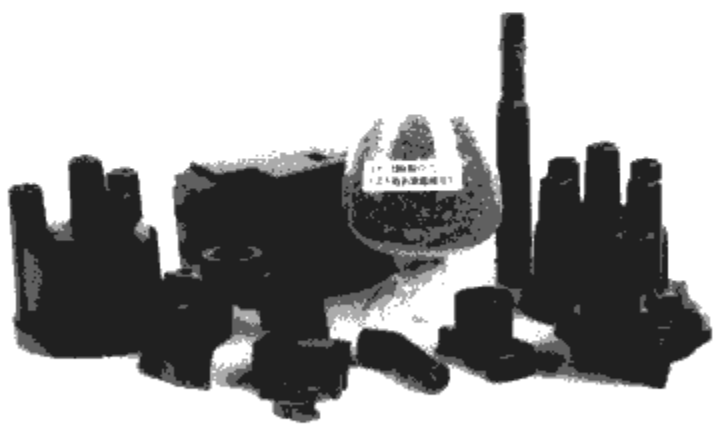


图 1.5-1 UP—100 塑料及其制品

耐热改性干式不饱和聚酯模塑料 PT—310 主要用于空调、冷柜、冰箱、洗衣机等家电的温控器、电源开关、电磁线圈骨架及接线端子的绝缘结构部件，低压电器、防爆电器等绝缘结构部件。PT—310 塑料及其制品如图 1.5-2 所示。

耐漏电改性干式不饱和聚酯模塑料 PT—610 、PT—620 主要用于制作航空、航天、雷达、兵器、舰船等军用电连接器绝缘体，以及邮电、通信、电力机车、铁路等民用的电连接

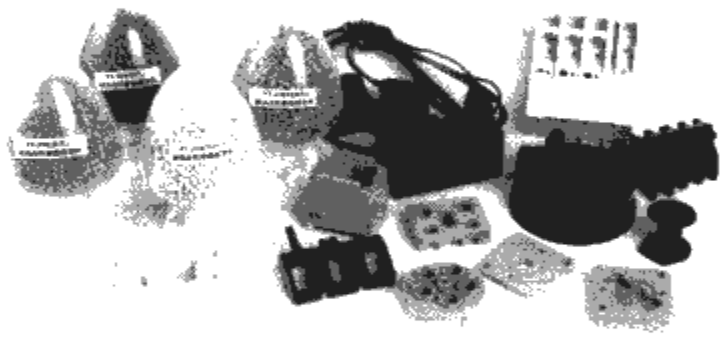


图 1.5-2 PT—310 塑料及其制品

器绝缘体及接线端子，电子集成块壳，继电器基座等绝缘结构部件。PT—610 塑料及其制品如图 1.5-3 所示。

密胺改性干式不饱和聚酯模塑料 MU—100 是以密胺（三聚氰胺）甲醛改性的不饱和聚酯模塑料，它集密胺塑料和不饱和聚酯模塑料的优点，形成一类新的电器用材料。密胺聚酯模塑料是以有机纤维作增强材料，所以其塑料制品具有较好的韧性，较小的摩擦系数，良好的耐磨性。密胺聚酯模塑料的突出特点是耐磨性能好，缺口冲击强度高，韧性好，有较高的耐电弧性和耐电痕化指数，主要用于电器产品

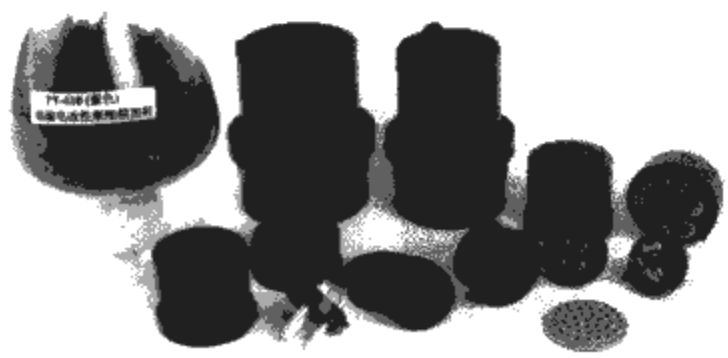


图 1.5-3 PT—610 塑料及其制品

的运动部件。如交流接触器的触头支持架和基座。MU—100塑料及其制品如图 1.5-4 所示。

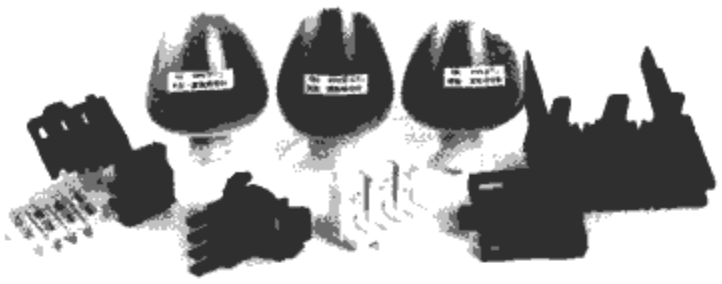


图 1.5-4 MU—100 塑料及其制品

4 GPO—3 模塑料

GPO—3 模塑料，又称 UPGM—203，指的是不饱和聚酯玻璃纤维毡板材料，机械和电气用，高湿下电气性能好，中等温度下力学性能好，具有阻燃性，耐电弧和耐抗漏电痕迹性能佳。由无碱玻璃纤维毡板浸以不饱和聚酯树脂糊经热压而成的硬性板状绝缘材料。

国内这种绝缘材料的生产厂家很少，但国外的需求量却是日益增加，在欧、美等国家中被广泛用作低压电器的主要绝缘材料。

4.1 物理性能

GPO—3 模塑料的物理性能列于表 1.5-23。

表 1.5-23 GPO—3 模塑料的物理性能

指标名称	单位	指标值
冲击强度(缺口)	kJ/m^2	≥60
弯曲强度	MPa	≥180(常态) ≥90(130℃/1h)
粘合强度	N	≥3800
巴氏硬度	—	≥50
密度	g/cm^3	1.85～2.10
吸水率(D—24/23)	—	≤0.15

4.2 介电性能

GPO—3 模塑料的介电性能列于表 1.5-24。

4.3 热性能

GPO—3 模塑料的热性能列于表 1.5-25。

表 1.5-24 GPO—3 模塑料的介电性能

指标名称	单位	指标值
介电强度(90℃±2℃油中)	MV/m	≥12
耐电弧性	s	≥180
耐电痕化指数(PTI)	V	≥600
击穿电压(于 90℃±2℃油中)	kV	>42
介质损耗因数 (1MHz,23℃水中浸 24h)	—	≤0.06
相对介电常数 (1MHz,23℃水中浸 24h)	—	≤4.5
绝缘电阻(浸水 24h 后)	Ω	$\geq 1.0\times10^{12}$

表 1.5-25 GPO—3 模塑料的热性能

指标名称	单位	指标值
热变形温度	℃	≥240
燃烧性	级	UL94V0 着火时间 ≥75s，燃烧时间≤85s

4.4 产品特点

(1) 优良的阻燃性、耐热性。阻燃等级 UL94V0 级，耐热等级达到 F 级（160℃以上）。

(2) 优良的耐电弧性。耐电弧性达 180s，耐抗漏电痕迹性达耐抗漏电起痕时间 500min，CTI>600V。

(3) 突出的电气性能。高负重强度比，热态机械强度良好，能在连续升温条件下，保持良好的力学和电气性能，空间稳定性高。

(4) 优良的机械加工性能。自动化加工程度高，可以通过车床加工、冲压、修剪、钻孔、喷砂、碾磨、锯和铣等方法加工成各种零部件；在装配方法上简便实用，可以用粘接、金属螺丝和铆接等方法装配。

4.5 适用范围和应用技术

GPO—3 层压板绝缘材料广泛应用于电机、电器设备中做绝缘结构件；汽车工业等领域。

框架式断路器：安全挡板、安全遮板、间隔衬垫、相间隔板等。

塑壳式断路器：相间隔板、灭弧室隔弧板等。

电动机：电机电枢部件、活动盖板、槽楔定子、定垫片、薄垫片、炭刷座等。高压调速装置和高压软起动器：功率单元中的绝缘支架。

变压器：变压器元件、通风散热棒、撑条、线棒、铁心与线圈间核心拐角绝缘。

第6章 云母制品

1 云母带

云母带是由片云母或粉云母纸与胶粘剂、补强材料加工制成的。云母带是高压电机线圈主绝缘的重要材料。最早生产的是沥青纸（或绸）片云母带，其优点是具有较好的电性能和工艺性。可以做大中型电机线圈连续绝缘。由于云母带的胶粘剂和补强材料的耐热性差，限制了主绝缘耐热等级的提高。20世纪50年代末60年代初相继出现无碱玻璃布、耐高温合成树脂和粉云母纸等新型材料，以及这些新材料为基础研制成功各种云母带，如环氧玻璃粉云母带、聚酯玻璃粉云母带等。随着电机工业不断向高压、大容量方向发展，对电机绝缘的机、电、热性能的要求越来越高。新发展的环氧玻璃粉云母带已基本上满足了上述发展的需要，已全部取代了沥青片云母绝缘。

云母带在室温下具有柔软性和可绕性，在冷、热态下力学、电气性能好，耐电晕性好。主要用于高压大中型电机主绝缘和耐火电缆绝缘。各种云母带的性能见表1.6-1。

1.1 环氧玻璃粉云母带

环氧玻璃粉云母带是以环氧体系作为胶粘剂，将玻璃布与云母纸复合而成。

1.1.1 物理性能

环氧玻璃粉云母带的物理性能列于表1.6-1。

表1.6-1 环氧玻璃粉云母带的物理性能

指标名称		单位	指标值
厚度	标称值	mm	0.14
厚度偏差	中值与标称厚度的偏差		±0.02
	个别值		±0.03
云母含量		g/m^2	82±86
玻璃布含量		g/m^2	36±4
胶粘剂含量①		g/m^2	74±9
干燥材料单位面积总质量		g/m^2	192±19
挥发物含量		%	≤2
胶化时间		min	供需双方协商
胶的流动性		%	≥45，或供需双方协商
柔软性		mm	供需双方协商

① 就干燥材料单位面积总质量而言，胶粘剂的含量约为38%。

1.1.2 电气性能

环氧玻璃粉云母带的电气性能列于表1.6-2。

表1.6-2 环氧玻璃粉云母带的电气性能

指标名称		单位	指标值
介电强度	固化前	MV/m	≥35
	固化后		≥35
在工频下介质损耗因数	常态	%	≤2.0

1.1.3 力学性能

环氧玻璃粉云母带的力学性能列于表1.6-3。

表1.6-3 环氧玻璃粉云母带的力学性能

指标名称			单位	指标值
拉伸强度			N/10mm	≥100
弯曲强度（固化后）	纵向	常态	MPa	≥180
		130℃		≥30
	横向	常态		≥100
		130℃		≥20
弯曲弹性模量（固化后）		纵向	MPa	≥24.0×10^3
		横向		≥14.0×10^3

1.1.4 产品特点

在常态下具有良好的柔软性；包绕线圈固化成型后具有较好的电气性能和优良的力学性能。

（1）介电性能好。从表1.6-4可以看出，同厚度的B级环氧粉云母绝缘比沥青片云母绝缘的介电强度高得多。如13.8kV级厚度为4mm时，比沥青片云母带高60%；如瑞典ASEA电压等级为13.8kV，绝缘厚度为4mm时，击穿电压为104kV，介电强度为29MV/m。而我国B级环氧粉云母绝缘厚度为4mm时，击穿电压为125kV，介电强度为31MV/m。

表1.6-4 沥青片云母和环氧粉云母绝缘电场强度对比

指标名称	单位	沥青片云母绝缘	桐油酸酐环氧粉云母绝缘
电压等级	kV	13.8	13.8
单面绝缘厚度	mm	4.75	4
平均击穿电压	kV	90.3	125
平均介电强度	MV/m	19	31

从图1.6-1和图1.6-2可以看出，环氧粉云母绝缘与沥青片云母绝缘的电压等级与介电强度，以及击穿电压与绝缘厚度的关系，说明环氧粉云母带的击穿场强高于沥青云母带。

绝缘线圈的电介质损耗因数值综合地反应了绝缘的整体性及材料的工艺性。环氧粉云母绝缘在室温和高温下均具有比沥青片云母绝缘小的介质损耗值。从表1.6-5可见沥青片云母绝缘线圈的介质损耗增量$\Delta\tan\delta$为2.5%，而环氧型玻璃粉云母线圈的$\Delta\tan\delta$为1%左右。

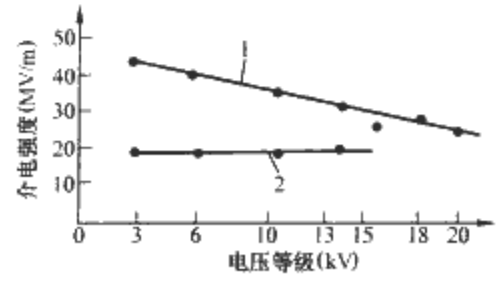


图1.6-1 不同电压等级与介电强度关系

1—环氧粉云母绝缘；2—沥青片云母绝缘

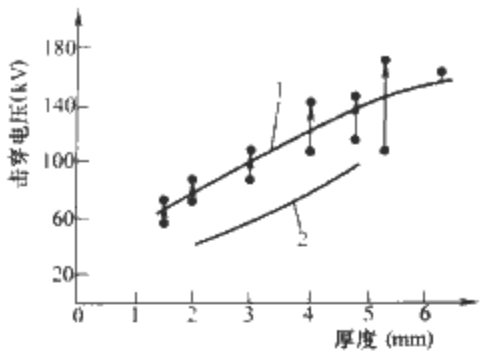


图 1.6-2 击穿电压与绝缘厚度的关系
1—环氧玻璃粉云母绝缘；2—沥青片云母绝缘

表 1.6-5 环氧粉云母带和沥青片云母带绝缘介质损耗因数对比

云母带绝缘种类	20℃,105℃,130℃					
	tan δ(%)			Δtan δ(%)	tan δ(%)	
	3kV	6kV	9kV		6kV	6kV
9541—1 粉云母带	0.80	1.50	1.9	1.1		6.36
5438—1 粉云母带	0.75	1.15	1.8	1.02		6.47
沥青片云母带	1.50	3.0	4.0	2.5	17	

(2) 力学性能高。环氧玻璃粉云母绝缘通过机械振动后，场强下降率和介质损耗变化均比沥青片云母绝缘小，如图 1.6-3 和图 1.6-4 所示。

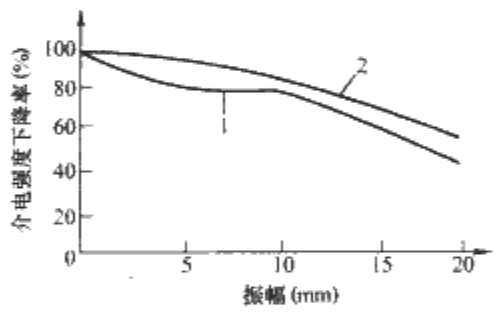


图 1.6-3 机械振动后绝缘的介电强度下降曲线
1—沥青片云母绝缘；2—环氧玻璃粉云母绝缘

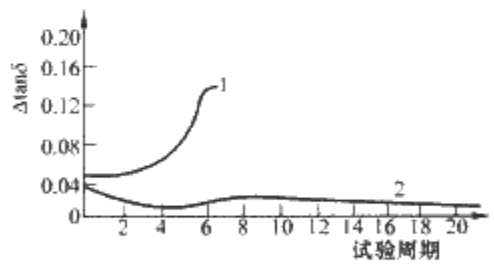


图 1.6-4 在机械振动和高压作用下绝缘的 tanδ 值变化
1—沥青片云母绝缘；2—环氧玻璃粉云母绝缘

(3) 厚度均匀性好。粉云母带的厚偏差范围小，是任何片云母带无法比拟的。

(4) 耐热性。沥青片云母绝缘是 A 级绝缘，它的运行温度是 105℃。而环氧粉云母绝缘是 B 级以上绝缘，它的运行温度是 130～155℃。从而电机的运行温度可以提高 25℃以上，这对提高电机出率是很有意义的。

(5) 耐湿热性。对 6kV 框式线圈（新绝缘采用复合式结构），经过 21 天湿热试验后，桐油酸酐环氧粉云母绝缘电阻为沥青片云母绝缘的 1.9～2.8 倍。桐油酸酐环氧粉云母绝缘的介电强度为 29～384 MV/m，最低为 60～90kV；而沥青云母绝缘的线圈的介电强度为 19.7MV/m，最低仅为 50kV，可以看出，桐油酸酐环氧玻璃粉云母绝缘优于沥青云母绝缘。

桐油酸酐环氧玻璃云母带是由以桐油酸酐固化双酚 A 型环氧树脂或钛改性环氧树脂为胶粘剂，与 501 型粉云母纸和无碱环璃布经烘焙而成。这种云母带具有优良的电能性和力学性能，三防性能也好，耐热等级较高，约为 130℃，其产品型号有 5438—1、9541—1，是目前高压电机的主要绝缘材料。由于桐油酸酐环氧树脂体系对温度敏感，使成品带储存期短，一般从制造日期算起，在温度为 5℃以下可存放 3 个月；20℃以下为 1 个月，20～30℃为半个月。经钛改性的胶粘剂制得的云母带，室温下储存期可稍长些。前者适用于线圈模压成型工艺，后者适用于模、液压两种成型工艺。

1.1.5 适用范围和应用技术

适用于工作温度为 130℃的各种大、中型高压电机线圈绝缘。

各用户应根据本厂的线圈成型工艺特点、传统习惯、当地气候及储存条件等，在技术要求规定的范围内选择恰当的胶化时间，以满足压制工艺要求，获得最佳应用效果。

1.2 F 级环氧桐马酸酐玻璃多胶粉云母带系列产品

20 世纪 70 年代末期西安绝缘材料厂研制成功的以“环氧桐马酸酐”体系为胶粘剂的多胶玻璃粉云母带，经桂林电器科学研究所、西安电力公司应用研究室采用了多种“绝缘材料老化”评定方法进行评定，达到了 F 级绝缘要求，用于 F 级高压大电机主绝缘，同时实现了工业化生产，1992 年制定了部颁标准 JB/T 6488.3—1992《5440—1 环氧桐马酸酐玻璃 F 级粉云母带》。

随着高电压大电机向着大容量、高电压方向的发展，电机厂对 F 级桐马粉云母带提出了新的要求，出现了各项性能优于 JB/T 6488.3—1992 标准的新产品——特 5440—1 环氧桐马酸酐玻璃粉云母带和 HEC5440—1 桐马环氧粉云母带。“快固化粉云母带”是在特 5440－1 环氧桐马酸酐玻璃粉云母带、HEC5440—1 桐马环氧粉云母带的基础上，为适应市场需要而开发的最新产品，“快固化”带是指用云母带包扎线圈后在模压固化成型工艺过程中能够大幅度缩短工艺时间。

桐马酸酐玻璃多胶粉云母带系列产品分为：

(1) 普通 5440－1 环氧桐马玻璃粉云母带。

(2) 特 5440－1 环氧桐马玻璃粉云母带。

(3) 快固化普 5440－1K；特 5440－1K。

1.2.1 F 级环氧桐马酸酐玻璃多胶粉云母带的组成

由熟云母纸为基材，双面电工无碱玻璃布为补强，经桐马酸酐环氧 F 级胶粘剂粘合成整体，经烘焙、收卷、切割加工而成的带状云母绝缘材料。其中：熟粉云母纸必须是指定的云母碎矿源，特定工艺制造的厚度均匀的高介电强度纸。电工无碱玻璃布是专用的平整度良好的高质量玻璃布。

胶粘剂的配方及工艺合理，原材料经过精选，使产品性能极为稳定，尤其是胶的胶化时间指标仅为 ±0.5min 的误差。3 大种粉云母带胶粘剂是有区别的，快固化粉云母带的胶粘剂更有其特殊的要求。

1.2.2 F 级环氧桐马酸酐玻璃多胶粉云母带产品特点

粉纸及玻璃布确定之后，胶粘剂的选型就决定了云母带的特点。快固化云母带的胶粘剂具有特别好的粘结力，尤其是高温下的粘结力比普通产品更好，分子量大小合适，既保证有合适的浸透能力，又保证有合适的交联程度，在模压成型过程中，树脂的流动状况具有既能充分渗透，又不能流失过大，使树脂在整个固化历程中能保证均匀分布又完全固化。云母带产品的特点是：

(1) 属多胶系统的粉云母带（胶含量33%～42%），需模压固化成型。

(2) 常态下具有柔软性，并有一定挺度，适合线圈的紧密包扎，云母带的树脂处于B阶段，有合适的成型时间，使之适合模压成型工艺，可以满足不同厂家的应用要求。

(3) 合适的挥发物。

(4) 固化后具有优异的力学、电气性能，确保了主绝缘的内在质量。

(5) 与普通云母带相比，这种带的挥发物少，而介电性能、力学性能高。

(6) 快固化带在确保各项性能的前提下，缩短了模压固化时间的1/2。

(7) 快固化带的电老化水平很高。

1.2.3 F级环氧桐马酸酐玻璃多胶粉云母带产品的主要性能

1.2.3.1 几类产品主要技术指标见表1.6-6。

表1.6-6　F级环氧桐马酸酐玻璃多胶粉云母带产品的主要技术指标

项目 \ 类别				5440—1普带		东方电机特粉云母带（协议标准）		哈电机特粉云母带（协议标准）	
				JB 6488.3.92	5440—1K	特5440—1	特5440—1K	HEC特5440—1H	HEC特5440—1K
固化前（云母带）	挥发物（%）			≤2	≤2	≤1.5	≤1.5	0.7～1.1	≤1.5
	挤出胶成型时间（min）			协议标准或 8～20 /170℃	协议标准或 1～7/170℃	5～10 /170℃ 1.5～4.5 /200℃	1～5/170℃ 10～40 /130℃	10～14 /170℃	1～7.5
	常温下介电强度（MV/m）			≥35	≥35	≥44	≥44	≥40	≥40
固化后（云母带压成板材完全固化）	tanδ（%）	常态		≤2	≤2	≤1	≤1	—	≤1
		155℃		≤5	≤5	≤3	≤3	—	≤3
	弯曲强度	常态	纵	≥200	≥200	≥200	≥200	—	≥200
			横	≥40	≥40	≥50	≥50	≥60	≥50
		155℃	纵	≥120	≥120	≥180	≥180	—	≥180
			横	≥30	≥30	≥40	≥40	—	≥40
	介电强度（MV/m）			≥40	≥40	≥50	≥50	≥70	≥70
	冲击强度（kJ/m）			—	—	—	—	≥80	≥80
	标准线棒介质损耗 tanδ（%）（铝排13×51mm，绝缘单面厚3.5mm）			—	—	—	—	9kV/155℃ <4	—
	标准线棒介电强度（MV/mm）（铝排13×51mm，绝缘单面厚3.5mm）			—	—	—	—	≥110/3.5	—
粉云母纸介电强度（MV/m）				—	—	—	—	≥33	≥33
储存期（月）	<5℃			6					
	5～20℃			3					
	20～30℃			1.5					

项目 \ 类别				5440—1普带		东方电机特粉云母带		哈电机特粉云母带	
				JB 6488.3—92	5440—1K	特5440—1	特5440—1K	HEC特5440—1H	HEC特5440—1K
固化前（云母带）	挥发物含量（%）			≤1.8	≤1.6	≤1.4	≤1.2	≤1.0	≤1.2
	挤出胶成型时间（min）			10.5	6.5	8.5 3.5	5.0 29.5	13	6.0
	常温下介电强度（MV/m）			≥42	≥45	≥52	≥54	≥52	≥56
固化后（云母带压成板材完全固化）	tanδ（%）	常态		≤1.0	≤1.0	≤0.56	≤0.51		≤0.43
		155℃		≤1.2	≤1.12	≤0.73	≤0.7		≤0.71
	弯曲强度	常态	纵	≥267	≥268	≥280	≥276		≥289
			横	≥190	≥195	≥220	≥226		≥230
		155℃	纵	≥50	≥51	≥74	≥94	≥81	≥92
			横	≥40	≥43	≥66	≥76		≥78
	介电强度（MV/m）			≥58	≥65	≥70	≥70	≥74	≥75
	冲击强度（kJ/m）							≥82	≥86
	标准线棒介质损耗因数 tanδ（%）（铝排13×51mm，绝缘单面厚3.5mm）			—	—	—	—	≤1.508	—
	标准线棒介电强度（MV/mm）			—	—	—	—	≥112/3.5	—
粉云母纸介电强度（MV/m）				—	—	—	—	≥33.5	≥33.5

1.2.3.2 产品的实测数据实例见表 1.6-6。

1.2.3.3 主绝缘结构性能（以 T5440—1K 为例说明）

（1）绝缘整体性好。模压后的主绝缘完全固化，颜色一致、尺寸均匀、内部没有发空和分层现象，整体性良好。

（2）常态介质损耗因数优。哈尔滨电机厂测试结果达到 DS/2J011—2002 的优等品水平，见表 1.6-7。东方电机厂测试结果见图 1.6-5 和表 1.6-8。

表 1.6-7 试验线棒的常态介质损耗 tan δ（%）（U_N=15kV）

项 目	试验编号	0.2U_N	0.4U_N	0.6U_N	0.8U_N	1.0U_N	$\Delta\tan\delta=\tan\delta_{0.6U_N}-\tan\delta_{0.2U_N}$
标准值	—	≤1.0	—	—	—	—	≤0.5
试验结果	K1—1	0.82	0.92	1.13	1.25	1.38	0.31
	K1—2	0.86	0.96	1.15	1.40	1.52	0.29
	K1—3	0.91	1.15	1.28	1.37	1.55	0.37

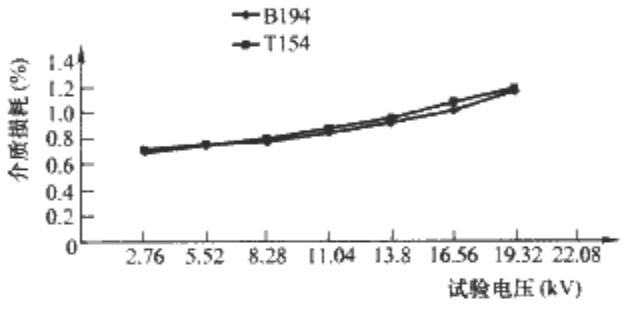


图 1.6-5 线棒常态介质损耗与试验电压关系曲线

表 1.6-8 室温介质损耗增量

铝排编号	试验温度(℃)	介质损耗增量(%)					
		0.4U_N～0.2U_N	0.6U_N～0.4U_N	0.8U_N～0.6U_N	1.0U_N～0.8U_N	1.2U_N～1.0U_N	1.4U_N～1.2U_N
B194	17.9	0.03	0.03	0.06	0.09	0.1	0.13
T154	17.9	0.02	0.04	0.08	0.1	0.12	0.09

表 1.6-9 标准试验线棒热态介质损耗

155℃/0.6U_N 下 tanδ（%）（U_N=15kV）

试验编号	优等品标准值	试验结果
K1—4	≤6.0	3.67
K2—4	≤6.0	4.58

（3）热态（155℃）介质损耗。哈尔滨电机厂测试结果见表 1.6-9，东方电机厂测试结果如图 1.6-6 所示。

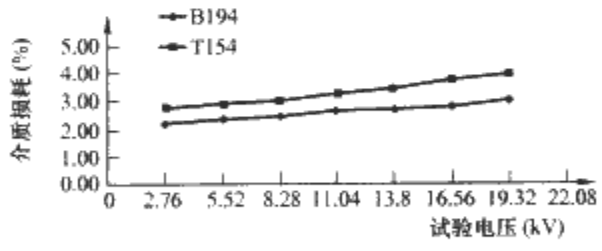


图 1.6-6 线棒热态介质损耗与试验电压关系曲线

（4）电气性能。瞬时击穿电压是一项反映电气强度性能的重要指标，哈尔滨电机厂经过多根线棒的试验，快固化云母带的击穿电压值和击穿场强都达到行业标准 DS/ZJ 011—2002 的优等品，见表 1.5-10。东方电机厂测试结果见表 1.6-11。

（5）热稳定性。热稳定性是考核热应力作用下绝缘尺寸变化的试验项目，经过 180℃/48h 热老化后，绝缘没有出现分层、发空、尺寸突变等现象。

表 1.6-10 瞬时击穿电压值和击穿场强

试验编号	击穿电压(kV)		击穿场强(MV/m)	
	优等品标准	试验结果	优等品标准	试验结果
XK—5	≥100	102.0	≥25	29.1
XK—8		108.0		30.8
XK—9		110.0		31.4
K2—1		114.3		32.6
K2—3		108.0		30.8
K2—4		106.1		30.3
K2—6		101.6		29.0

表 1.6-11 东方电机厂测试电气性能结果

试验编号	击穿电压(kV)	击穿场强(MV/m)
B194	105	31.8
T154	95	28.8

（6）电老化寿命。电老化寿命试验是考核绝缘材料的一项重要技术指标，设定试验电压 35kV，绝缘厚度 3.5mm，模拟 10MV/m 的超电场强度负荷运行状态。哈尔滨电机厂共选取了 5 根试验线棒投入电老化寿命试验，试验结果电老化寿命达到了 1340h 以上（F 级桐马环氧玻璃粉云母带要求电老化寿命中值大于或等于 700h，最小值大于或等于 500h），完全满足高压电机主绝缘要求。

东方电机厂在室温下对试样进行试验电压值为 2U_N 及 3U_N 的工频交流电老化试验。SIEMENS 公司要求 2U_N 长期电老化寿命大于 1000h，3U_N 的长期电老化寿命大于 10h。试验结果见表 1.6-12。

表 1.6-12 工频交流电老化试验结果

线棒编号	试验电压(kV)	老化寿命	击穿点
1	27.6(2U_N)	>2058h	未击穿
3	27.6(2U_N)	>2058h	未击穿
7	45.5(3.297U_N)	20.4	低阻内距低末 50mm、棱角处
8	45.5(3.297U_N)	41.8	低阻内距低末 50mm、棱角处

1.2.4 适用范围和应用技术

云母带应用到高电压大、中型电机线圈的主绝缘。一般来说，普带用在高压中型电机主绝缘，特带用在大型高电压电机线圈主绝缘上。比如，300MV 和 600MV 以上机组就用此类特带。近年来，以上云母带的应用范围在逐渐被同类型的相对应的“快固化带”所逐步代替了。

应用此类云母带采用 1/2 搭边包绕到线圈上，经模压成型完全固化的主绝缘，如以快固化带的模压工艺为例说明如下：温升速度为 0.8～1.2℃/min；初压温度为 120～125℃；全压温度为 140～145℃；保温过程为 170℃/2h±5℃/2h 。

1.3 桐马环氧玻璃粉云母带

1.3.1 物理性能

桐马环氧玻璃粉云母带的物理性能列于表 1.6-13。

表 1.6-13 桐马环氧玻璃粉云母带的物理性能

指标名称		单位	指标值
厚度	标称值	mm	0.14
偏差	中值与标称厚度的偏差		±0.02
	个别值		±0.03
云母含量		g/m²	$82\pm^{6}_{6}$
玻璃布含量		g/m²	36±4
胶粘剂含量①		g/m²	74±9
干燥材料单位面积总质量		g/m²	192±19
挥发物含量		%	≤2
胶化时间		min	供需双方协商
胶的流动性		%	≥45
柔软性		mm	供需双方协商

① 就干燥材料单位面积总质量而言，胶粘剂的含量约为 38%。

1.3.2 电气性能

桐马环氧玻璃粉云母带的电气性能列于表1.6-14。

表1.6-14 桐马环氧玻璃粉云母带的电气性能

指标名称		单位	指标值
介电强度	固化前	MV/m	≥35
	固化后		≥40
在工频下介质损耗因数	（固化后）室温	%	≤2.0

1.3.3 力学性能

桐马环氧玻璃粉云母带的力学性能列于表1.6-15。

表1.6-15 桐马环氧玻璃粉云母带的力学性能

指标名称			单位	指标值
拉伸力（固化前）			N/10mm	≥100
弯曲强度（固化后）	纵向	常态	MPa	≥200
	横向	155℃		≥40.0
		常态		≥120
		155℃		≥30.0
弯曲弹性模量（固化后）		纵向	MPa	$\geqslant 40.0\times10^3$
		横向		$\geqslant 30.0\times10^3$

1.3.4 产品特点

电性能优良，耐热指数达到F级155℃。室温储存期长达6个月以上，云母带柔软爽手，工艺性好，使用方便。云母带在常态下具有良好的柔软性和储存稳定性；包绕线圈成型后具有优良的电气性能和良好的力学性能，综合性能优于国内其他F级环氧玻璃粉云母带。

1.3.5 适用范围和应用技术

适用于工作温度为155℃的各类大、中型高压电机线圈绝缘。

1.4 环氧硼胺玻璃粉云母带

5441—1（D604—1）环氧硼胺玻璃粉云母带系由环氧硼胺云母胶粘合云母纸，双面以电工无碱玻璃布补强，经烘焙切割而成。

1.4.1 物理性能

环氧硼胺玻璃粉云母带的物理性能列于表1.6-16。

表1.6-16 环氧硼胺玻璃粉云母带的物理性能

指标名称		单位	指标值
厚度	标称值	mm	0.14
偏差	平均值		±0.02
	个别值		±0.03
云母含量		g/m^2	$85\pm^{8}_{6}$
胶粘剂含量		g/m^2	75±10
玻璃布含量		g/m^2	38±4
挥发物含量		%	≤2
柔软性		mm	记录数据
胶化时间（200℃±2℃，小刀法）		min	3.0~5.5

1.4.2 电气性能

环氧硼胺玻璃粉云母带的电气性能列于表1.6-17。

表1.6-17 环氧硼胺玻璃粉云母带的电气性能

指标名称		单位	指标值
介电强度	平均值	MV/m	≥35
	最小值		≥20

1.4.3 力学性能

环氧硼胺玻璃粉云母带的力学性能列于表1.6-18。

表1.6-18 环氧硼胺玻璃粉云母带的力学性能 N/10mm

指标名称	指标值
拉伸强度	≥100

1.4.4 产品特点

云母带在常态下具有良好的柔软性和储存稳定性，包绕线圈固化成型后具有较好的电气性能和优良的力学性能。由于胶粘剂的特殊组成，5441—1（D604—1）云母带固化以后具有优良的电气力学性能，特别是高温下力学性能的保持率很高。

1.4.5 适用范围和应用技术

适用于采用模压半固化工艺成型的F级大、中型高压电机定子线圈端部绝缘。

1.5 快固化云母带

D615—1快固化高强度环氧玻璃多胶粉云母带是以云母纸（$84g/m^2$）为基材，采用快固化高强度环氧胶粘剂，双面用电工无碱玻璃布补强复合制造的多胶云母带，是5440—1环氧桐马玻璃粉云母带的高效节能型和高性能替代型用于大中型高压电机主绝缘的材料。表1.6-19列示了粉云母带的主要组分。

表1.6-19 粉云母带的组分规格

项目	标称厚度（mm）	云母定量（g/m^2）	玻布定量（g/m^2）	树脂含量（g/m^2）	挥发物量（%）
标准	0.15±0.02	76~90	40±4	85~100	≤2.0
标准	0.20±0.02	130±10	40±4	110~140	≤2.0

注 云母定量、厚度规格可由供需双方商定。

1.5.1 物理性能

D615—1快固化高强度环氧玻璃多胶粉云母带的物理性能列于表1.6-20。

表1.6-20 D615—1快固化高强度环氧玻璃多胶粉云母带的物理性能

指标名称		单位	指标值
胶化时间	170℃（小刀法或圆孔法）	min	小刀法，1.0~5.0
			圆孔法，1.0~8.0
柔软性 25℃±1℃		mm	≥140
胶的流动性		%	≥50

1.5.2 电气性能

D615—1快固化高强度环氧玻璃多胶粉云母带的电气性能列于表1.6-21，表1.6-22是真机线圈电老化评定结果，表1.6-23是真机线圈的$\tan\delta$特性，表1.6-24线圈的击穿试验结果。

表1.6-21 D615—1快固化高强度环氧玻璃多胶粉云母带的电气性能

指标名称		单位	指标值
在工频下介质损耗因数（2mm平板）	常态	—	≤0.01
	155℃		≤0.03
介电强度（固化前）		MV/m	≥35
介电强度（固化后1mm平板）			≥50

表 1.6-22 真机线圈电老化评定结果（场强：13.0MV/m）

恒仁线圈编号	T351	B318	T93	B362
老化寿命(h)	37	22	38	27
三峡 VGS 标准	$3.0U_N$(13.0MV/m)，常温>10h			

表 1.6-23 真机线圈的 tan δ 特性

额定电压 U_N=13.8		tan δ（%）		
		$0.2U_N$	$0.6U_N$	$1.4U_N$
恒仁机组线圈	室温	0.54	0.56	0.75
	155℃	3.92	4.01	4.17
东风机组线圈	室温	0.51	0.55	0.78
	155℃	3.76	3.80	4.02

注 固化条件：170℃ 2.5h。

表 1.6-24 线圈的击穿试验结果（δ=4.5mm）

击穿电压（平均值 kV）	E_{np}（MV/m）
130	28.8

1.5.3 力学性能

D615—1 快固化高强度环氧玻璃多胶粉云母带的力学性能列于表 1.6-25。

表 1.6-25 D615—1 快固化高强度环氧玻璃多胶粉云母带的力学性能

指标名称			单位	指标值
拉伸力（固化前）			N/10mm	≥100
弯曲强度	纵向	常态	MPa	≥200
		155℃		≥100
	横向	常态		≥150
		155℃		≥60
常态弯曲模量		纵向	MPa	$\geq 1.0\times10^3$
		横向		$\geq 1.0\times10^3$

1.5.4 产品特点

（1）快速固化性。相同绝缘结构的模压保温时间，较 5440—1 环氧桐马玻璃粉云母带节约 1/3～1/2。

（2）高力学性能。产品的玻璃化转变温度 T_g>140℃，较 5440—1 环氧桐马玻璃粉云母带绝缘结构提高 50℃以上，能够有效避免线圈热出模时的形变损伤。

（3）高绝缘性能。绝缘结构 tanδ 特性、电老化评定等均满足国际 VGS 联合体的三峡线圈对应技术标准。

（4）储存使用性。常态下具有良好柔软性，机包、手包均能适应，且储存使用性优良，20℃储存期可达 60d，5℃以下大于 180d。

1.5.5 适用范围和应用技术

适用于工作温度 155℃的各种大中型高压电机的模压线圈绝缘。使用工艺建议：

（1）包扎。由于胶粘剂固化后密度较大的原因，本产品设定的标称厚度、树脂含量较 5440—1 云母带高，产品具有更大的可压缩性。包扎尺寸控制压缩量应大于 25%，一般在 30%左右为宜；包扎层数应和原 5440—1 云母带保持一致，建议为半叠包 5 层/mm。

（2）模压。产品具有良好的热态树脂流动性，能够适应经典的模压工艺过程：

1）入模及预压：应当在低于 120℃下入模，当入模温度偏高时，请勿过早快速加压（内加热油压机工艺方式更须谨慎），以避免表层树脂过分流失而出现浅表发空，在接触压力下待线圈整体预热均匀并根据树脂溢流状态而适时加压。

2）全压及保温：本云母带在 130℃的胶化时间为：20～40min，当温度在 130～140℃内时，应根据出胶状态而及时全压，并升温至大于 160℃保温固化，保温时间应根据具体产品线圈考核要求而定，一般较 5440—1 云母带可缩短对应保温时间 40%～50%。

3）线圈出模：应该在低于保温温度 10℃以后出模。

4）预烘：预烘有助于减少树脂流失，提高绝缘结构整体性，本产品具有良好的预烘后模压安全性，90～100℃下预烘 1～2h，可以基本保持原有胶化时间，但提高树脂软化点，减少模压流失，提高整体性和绝缘性能水平。

1.6 中胶粉云母带

5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带系由环氧云母胶粘合云母纸，双面以电工无碱玻璃布补强，经烘焙切割而成。

1.6.1 尺寸及允差

表 1.6-26 给出了 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的尺寸及允差。

表 1.6-26 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的尺寸及允差 mm

标称厚度	允许偏差	
	平均值	个别值
0.14	±0.02	±0.03

注 其他尺寸由供需双方协商。

1.6.2 组成及物理性能

粉云母带的组成成分和允许偏差见表 1.6-27。表 1.6-28 列示了 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的物理性能。

表 1.6-27 粉云母带的组成成分和允许偏差

云母含量（g/m²）		玻璃布含量（g/m²）		胶粘剂含量①（g/m²）		干燥材料单位面积总质量（g/m²）		挥发物含量（%）
标称值	偏差	标称值	偏差	标称值	偏差	标称值	偏差	
120	±10	38	±6	40	±5	198	±20	≤2.5

① 就干燥材料单位面积总质量而言，胶粘剂含量约为 20%。

表 1.6-28 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的物理性能

指标名称		单位	指标值
胶化时间	（200℃±2℃，小刀法）	min	1.5～3.0
柔软性		mm	记录数据

1.6.3 电气性能

表 1.6-29 和表 1.6-30 给出了 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的电气性能。

表 1.6-29 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的介电强度 MV/m

指标名称	指标值
介电强度平均值	≥25

表 1.6-30 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的 tanδ 特性(U_N=6kV，δ=1.8mm)

烘焙条件	室温，tanδ(%)		155℃，tanδ(%)	E_b
	$0.2U_N$	$0.6U_N$～$0.2U_N$	$0.6U_N$	(MV/m)
145℃，20h	0.78	0.21	6.18	36.1
155℃，20h	0.56	0.33	6.30	40.3
155℃，15h	0.65	0.29	8.40	37.3
165℃，10h	0.58	0.45	5.65	37.2
优等品标准	≤1.5	≤1.0	≤15.0	≥25.0

注 表中均为3只线圈平均值。

1.6.4 力学性能

表1.6-31给出了5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的力学性能。

表 1.6-31 5444—1(D607—1)环氧玻璃中胶粉云母带的力学性能 N/10mm

指标名称	指标值
拉伸力	≥100

1.6.5 产品特点

云母带在常态下具有较好的柔软性和良好的包扎工艺性、储存稳定性，其胶粘剂固化后具有优良的电气性能、力学性能和耐氟里昂性能。

1.6.6 适用范围和应用技术

中胶粉云母带与D027环氧无溶剂整浸树脂配套，适用于工作温度为155℃的大、中型高压电机定子线圈和其他各种电机、电器线圈绝缘。

1.7 少胶云母带

5442—1环氧玻璃少胶粉云母带是以粉云母纸为基材，以改性环氧胶粘剂，单面以电工无碱玻璃布补强制造的，胶粘剂含量为5%～11%的粉云母带。

1.7.1 物理性能

表1.6-32给出了5442—1少胶粉云母带物理性能。

表 1.6-32 5442-1 少胶粉云母带物理性能

标称厚度 (mm)	云母定量 (g/m^2)	玻璃布定量 (g/m^2)	树脂含量 (%)	挥发物含量 (%)
0.15±0.02	180±14	20±2	5～11	≤0.5
0.13±0.02	160±10	20±2	5～11	≤1
0.11±0.02	120±10	20±2	5～11	≤1

1.7.2 电气性能

本产品与D027环氧无溶剂浸渍树脂模拟相容固化后常规电气性能见表1.6-33和表1.6-34。

表 1.6-33 模拟胶片常规性能 (25份胶粘剂：75份D027)

体积电阻率 (Ω·m)		介电常数		介质损耗因数		介电强度 (MV/m)
室温	155℃	室温	155℃	室温	155℃	室温
1.2×10^{14}	1.1×10^{10}	3.14	4.54	0.003 5	0.027 5	31.5

注 固化条件：170℃ 10h。

表 1.6-34 6.0kV级应用线圈绝缘性能 (模结构胶含量：31%，δ=1.8mm)

项目	tanδ(%)				E_b(MV/m)
测试条件	室温			155℃	室温
	$0.2U_N$	$0.6U_N$	$0.6U_N$～$0.2U_N$	$0.2U_N$	
测试结果	0.68	1.20	0.52	3.56	54
优等品标准	≤3	—	≤1.5	≤8	≥42

注 固化条件：110℃ 10h+170℃ 10h。

1.7.3 力学性能

表1.6-35给出了5442—1少胶粉云母带拉伸强度。

表 1.6-35 5442—1 少胶粉云母带拉伸强度 N/10mm

指标名称	指标值	
	0.15±0.02	0.13±0.02
拉伸强度	≥60	≥60

1.7.4 产品特点

本产品常态下具有较好的柔软性、开盘不泛粘、包扎不飞粉的工艺优点，能够满足电机行业对少胶粉云母带的性能要求。本产品能够与环氧类无溶剂浸渍树脂相容固化成型，并具可靠的绝缘性能。本产品具有较稳定的常温储存性。

1.7.5 适用范围和应用技术

适用于F级6.0kV及6.0kV以上高压电动机的VPI绝缘处理。

1.8 厚型云母带

D612—1厚型环氧玻璃粉云母带系由环氧云母胶粘合厚型云母纸，双面以电工无碱玻璃布补强，经烘焙切割而成。

1.8.1 物理性能

表1.6-36给出了D612—1厚型环氧玻璃粉云母带的物理性能。

表 1.6-36 D612—1 厚型环氧玻璃粉云母带的物理性能

指标名称		单位	指标值	
厚度	标称值	mm	0.20	0.18
偏差	中值与标称厚度的偏差	mm	±0.02	
	个别值	mm	±0.03	
云母含量		g/m^2	≥150	≥120
玻璃布含量		g/m^2	40±4	
胶粘剂含量		g/m^2	120～140	100～120
		%	37～41	
挥发物含量		%	≤2.0	
胶化时间①		min	1.5～3.5/200℃，或3.0～10.0/170℃（小刀法或圆孔法）	
胶的流动性		%	≥50	
柔软性	(25℃±1℃)	mm	记录	

① 胶化时间如有特殊要求可由供需双方协商。

1.8.2 电气性能

D612—1厚型环氧玻璃粉云母带的电气性能列于表1.6-37。

表 1.6-37 D612—1 厚型环氧玻璃粉云母带的电气性能

指标名称			单位	指标值
介电强度	固化前		MV/m	≥40
	固化后			≥50
在工频下介质损耗因数		常态	%	≤1.0

1.8.3 力学性能

D612—1 厚型环氧玻璃粉云母带的力学性能列于表 1.6-38。

表 1.6-38 D612—1 厚型环氧玻璃粉云母带的力学性能

指标名称			单位	指标值
拉伸力(固化前)			N/10mm	≥100
弯曲强度	纵向	常态	MPa	≥200
		155℃		≥50
	横向	常态		≥150
		155℃		≥35
常态弯曲弹性模量		纵向	MPa	$\geq 1.0\times10^3$
		横向		$\geq 1.0\times10^3$

1.8.4 产品特点

云母带在常态下具有良好的柔软性和储存稳定性，固化成型后具有较好的电气性能和优良的力学性能。

1.8.5 适用范围和应用技术

适用于工作温度为 155℃的各类大、中型高压电机线圈绝缘。

D612—1 厚型环氧玻璃粉云母带由于胶粘剂的特殊组成而具有良好的固化特性，因此用于制造电机线圈时，压制工艺幅度较宽，对压制条件要求不苛刻，可以采用国内传统的使用 5438—1 环氧玻璃粉云母带的各种成型工艺(如：液压、全模压等工艺)。

1.9 二苯醚云母带

D613—1 和 D614—1 云母带以云母纸为基材，以改性聚二苯醚云母胶为胶粘剂，双面以电工无碱玻璃布为补强材料。

1.9.1 组成及物理性能

表 1.6-39 给出了二苯醚云母带的标称厚度及允差，表 1.6-40 给出了二苯醚云母带的组成，二苯醚云母带柔软性指标由供需双方协商确定。

表 1.6-39 二苯醚云母带的标称厚度及允差 mm

型号	标称厚度	偏差	
		中值与标称厚度的偏差	个别值与标称厚度的偏差
D613—1	0.14	±0.02	±0.03
D614—1	0.14	±0.02	±0.03

表 1.6-40 二苯醚云母带的组成

型号	云母含量(%)	胶粘剂含量		挥发物含量(%)
		(g/m^2)	(%)	
D613—1	≥45	35～50	16～24	≤2.0
D614—1	≥37	32～80	20～40	≤4.0

1.9.2 电气性能

二苯醚云母带的介电强度列于表 1.6-41。

表 1.6-41 二苯醚云母带的介电强度 MV/m

指标名称	指标值	
	D613—1	D614—1
介电强度	≥20	≥20

1.9.3 力学性能

二苯醚云母带的力学性能列于表 1.6-42。

表 1.6-42 二苯醚云母带的力学性能 N/10mm

指标名称	指标值	
	D613—1	D614—1
拉伸力	≥100	≥70

1.9.4 产品特点

在常态下具有良好的包绕性，与二苯醚无溶剂树脂配套，经 VPI 处理固化成型后，具有良好的电气性能和力学性能。

1.9.5 适用范围和应用技术

D613—1 适用于工作温度 200℃的牵引电机绕组绝缘，D614—1 适用于工作温度 180℃的牵引电机绕组绝缘。

1.10 耐火云母带

5461—3D、5461—3S 耐火电缆用粉云母带是以云母纸为基材，以有机硅树脂为胶粘剂，单面或双面以电工用无碱玻璃布作补强材料制成的。

1.10.1 组成及标称厚度和宽度

耐火电缆用粉云母带的标称厚度、宽度及允差列于表 1.6-43、表 1.6-44，表 1.6-45 列出了耐火电缆用粉云母带的组成。

表 1.6-43 耐火电缆用粉云母带的标称厚度及允差 mm

型号	标称厚度	偏差	
		平均值	个别值
5461—3D (单面补强)	0.10	±0.02	±0.03
	0.12	±0.02	±0.03
	0.14	±0.02	±0.03
	0.16	±0.02	±0.03
5461—3S (双面补强)	0.14	±0.02	±0.03
	0.16	±0.02	±0.03

表 1.6-44 耐火电缆用粉云母带的标称宽度及允差 mm

标称宽度	偏差
<20	±1.0
≥20，<500	±2.0
≥500	±5.0

表 1.6-45 耐火电缆用粉云母带的组成

产品型号	云母含量(%)	玻璃布含量(g/m^2)	胶粘剂含量(%)	挥发物含量(%)
5461—3D	≥60	20±2	≤17	≤1.0
5461—3S	≥55	2×(20±2)		

1.10.2 电气性能

耐火电缆用粉云母带的电气性能列于表 1.6-46。

表 1.6-46 耐火电缆用粉云母带的电气性能

指标名称	单位	指标值	
		5461—3D	5461—3S
工频介电强度（常态）	MV/m	≥10	≥8
体积电阻率（常态）	Ω·m	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}

1.10.3 力学性能

耐火电缆用粉云母带的力学性能列于表 1.6-47。

表 1.6-47 耐火电缆用粉云母带的力学性能

指标名称	单位	指标值	
		5461—3D	5461—3S
拉伸力	N/10mm	≥60	≥100
挺度	N/m	按合同规定	

1.10.4 产品特点

在常态时具有优异的耐高温性、耐燃烧性及良好的绕包性。

1.10.5 适用范围和应用技术

适用于耐火等级为 A 类(950℃)或 B 类(750℃)的各种耐火电线电缆中做主要耐火绝缘层。

1.11 9547—1 单面玻璃少胶粉云母带

国外 1940 年就成功地将 VPI 绝缘技术应用于发电机定子绝缘中，1970 年应用于大中型高压电机的主绝缘中，1990 年已经广泛应用于各种电机、电器的绝缘处理中。

我国从 1970 年开始 VPI 绝缘体系的研究工作，1980 年引进国外 VPI 绝缘技术，开始研制少胶带，基于当时的材料及设备等条件的局限性，少胶带的研究进展缓慢。到了 1990 年，各大绝缘制造公司与应用公司投入了巨大的人力物力，密切合作研究 VPI 绝缘技术，推动了少胶 VPI 绝缘体系向前发展。于 1990 年末，国内根据市场的需求研制并批量生产了聚酯亚胺单面玻璃少胶粉云母带(以下简称少胶带)，其型号为 9547—1，规格有 0.11mm×25mm、0.13mm×25mm、0.15mm×25mm。

1.11.1 组成

少胶带是以不饱和聚酯亚胺胶粘剂粘合粉云母纸，单面以电工用无碱玻璃布补强，经烘焙加工而成的。

1.11.2 物理及力学性能

表 1.6-48 列出了少胶带的物理及力学性能。

表 1.6-48 少胶带的物理及力学性能

试验项目	指标值
外观	胶粘剂分布均匀，不允许有外来杂质、分层、粉云母纸断裂、玻璃布抽丝和带盘松动现象
厚度(mm)	0.11±0.02，个别值±0.03
	0.13±0.02，个别值±0.03
	0.15±0.02，个别值±0.03
盘径(mm)	95±5
宽度(mm)	25±2
边缘弯曲度(mm)	≤1
管芯内径(mm)	40±2
云母含量(%)	≥70
胶含量(%)	7～13
挥发物含量(%)	≤1
拉伸力(N/10mm)	≥60

1.11.3 介电性能

表 1.6-49 列出了少胶带的介电性能。

表 1.6-49 少胶带的介电性能

试验项目	试验值
电气强度(MV/m)	≥10

1.11.4 热性能

少胶带具有良好的电气、力学性能，耐热等级 F 级。

1.11.5 产品特点

少胶带具有良好的柔软性，开盘不泛粘，包扎不飞粉的特点。

1.11.6 适用范围和应用技术

少胶带与 H9110 不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂配套使用，采用真空压力浸渍工艺，适用于高压电机绝缘及其他各种电机、电气绝缘。

1.12 桐马环氧玻璃粉云母带

云母带是高压电机线圈的主绝缘材料。1966 年由一机部电气科学研究院、西安绝缘材料厂、哈尔滨绝缘材料厂联合开发，首次研制出了国产云母带—B 级带，并于当年在哈尔滨绝缘材料厂正式投产。随着电气工业的发展，对云母带的耐热等级提出新的要求，为此 1980 年初由哈尔滨绝缘材料厂首次研制成功了 9545—1F 级桐马环氧玻璃粉云母带；1990 年，为了赶上世界主绝缘的先进水平，提高电机运行的可靠性及运行寿命，哈尔滨绝缘材料厂研制并批量生产了高云母含量的 9545—1G 桐马环氧玻璃粉云母带，实现了我国绝缘技术的突破。随着电机单机容量的不断增大，额定电压的提高，对云母带主绝缘材料要求更高，同期哈尔滨绝缘材料厂又开发出了耐高电压的 9545—1H 桐马环氧玻璃粉云母带，该产品以其优异的介电性能、良好的工艺性等，广泛应用于大中型高压电机的主绝缘中。为了适应三峡水轮发电机主绝缘材料国产化的需求，对 9545—1H 的性能进行了改进和提高，完全满足了单机容量为 700MW、电压等级为 20kV 的三峡电站左岸机组主绝缘材料的性能要求，并应用于生产单机容量为 700～750MW 三峡电站右岸机组的主绝缘。表 1.6-50 为桐马环氧玻璃粉云母带(简称桐马带)所对应的型号及规格。

表 1.6-50 桐马带型号及规格

型号	规格(mm)
9545—1	0.14
9545—1G	0.18
9545—1H	0.14

1.12.1 组成

桐马带是以粉云母纸为主要原材料，双面以无碱玻璃布补强，用环氧树脂胶粘剂做粘合，经烘焙等工艺加工制成的。

1.12.2 物理、力学及介电性能

桐马带固化前的物理、力学及介电性能应符合表 1.6-51 的规定。

表 1.6-51 桐马带固化前的物理、力学及介电性能

序号	指标名称	单位	指标值
1	外观		不允许有外来杂质、粘连、分层和抽丝现象(但允许由于粉纸接头局部多胶引起的粘连、分层现象)，胶粘剂分布均匀，粉云母纸不允许有断裂，并在常温(20℃±5℃)下应柔软

更多专业资料请访问电建论坛

续表

序号	指标名称	单位	指 标 值	
2	厚度	mm	0.14±0.02，个别值±0.03	0.18±0.02，个别值±0.03
3	盘径	mm	95±5、115±5	
4	宽度	mm	25±1	
5	边缘弯曲度	mm	≤1	
6	管芯内径	mm	40±2、55±2	
7	云母含量	%	≥40	≥48
8	胶含量	%	≥34	
9	挥发物含量	%	≤2	
10	拉伸力	N/10mm	≥100	
11	电气强度	MV/m	≥40	

1.12.3 热性能及固化后物理、力学及介电性能

桐马带的热性能及固化后物理、力学及介电性能应符合表 1.6-52 规定。

表 1.6-52 桐马带的热性能及固化后的物理、力学及介电性能

指 标 名 称			单位	指标值
胶化时间(170℃±2℃)			min	8～20
耐热等级			级	F
密度			kg/m^3	≥1.8
弯曲强度	纵向	常态	MPa	≥200
		155℃	MPa	≥40
	横向	常态	MPa	≥120
		155℃	MPa	≥30
弯曲弹性模量		纵向	MPa	$\geq 40.0\times10^3$
		横向	MPa	$\geq 30.0\times10^3$
电气强度			MV/m	≥40
(小线棒)介质损耗因数		常态	%	≤2
		热态 155℃	%	≤5

1.12.4 产品特点

桐马带工艺性良好，工艺幅度宽，适合于不同厂家、不同季节使用，具有优异的电气及力学性能，它是一种高性能的主绝缘材料，完全满足高压大电机组主绝缘的要求。

其主要特点有：

(1) 电气强度高：9545—1H 所用的云母纸比 9545—1 所用的云母纸电气强度高 3MV/m。

(2) 包扎工艺性好、工艺幅度宽：桐马带柔软、包扎时服贴、紧密，压制时尺寸容易控制，适合于不同厂家、不同季节使用。

(3) 质量稳定性好：桐马带胶粘剂分布均匀，厚度公差小，产品性能组成成分符合用户要求，制成线棒后，绝缘性能非常稳定。

(4) 机械及介电性能：桐马带具有良好的力学及介电性能，常、热态介质损耗因数及其增量小，老化寿命长。

(5) 耐热性：桐马带的耐热等级为 F 级。

1.12.5 适用范围和应用技术

桐马带采用环氧多胶粉云母带模压工艺，适用于大中型高压电机线圈的主绝缘及其他各种电机、电器绝缘。

1.13 5438—1 环氧玻璃粉云母带

云母带是高压电机线圈的主绝缘材料。1966 年由一机部北京电气科学研究院（桂林电科所前身）、西安绝缘材料厂、哈尔滨绝缘材料厂联合开发，首次研制并批量生产了 5438—1 环氧玻璃粉云母带（以下简称 B 级带）。

1.13.1 组成

B 级带以粉云母纸为主要原材料，双面以无碱玻璃布补强，用环氧树脂胶粘剂做粘合，经烘焙等工艺加工制成的。

1.13.2 物理、力学及介电性能

B 级带固化前的物理、力学和介电性能应符合表 1.6-53 规定。

表 1.6-53 B 级带固化前的物理、机械及介电性能

指标名称	单位	指 标 值
外 观		不允许有外来杂质、粘结、分层、和抽丝现象（但允许由于粉纸接头及局部多胶引起的粘连、分层现象），胶粘剂分布均匀，粉云母纸不允许有断裂。并在常温（20℃±5℃）下，应柔软
厚 度	mm	0.14±0.02，个别值±0.03
盘 径	mm	95±5、115±5
宽 度	mm	25±1
边缘弯曲	mm	≤1
管芯内径	mm	40±2
云母含量	%	≥40
胶含量	%	≥34
挥发物含量	%	≤2
拉伸力	N/10mm	≥100
电气强度	MV/m	≥40

1.13.3 热性能及固化后的物理、力学及介电性能

B 级带的热性能及固化后的物理、力学及介电性能应符合表 1.6-54 规定。

表 1.6-54 B 级带的热性能及固化后的物理、力学及介电性能

指标名称			单 位	指标值
胶化时间（170℃±2℃）			min	8～20
耐热等级				B 级
弯曲强度	纵向	常态	MPa	≥180
		130℃	MPa	≥30
	横向	常态	MPa	≥100
		130℃	MPa	≥20
弯曲弹性模量		纵向	MPa	$\geq 24.0\times10^3$
		横向	MPa	$\geq 14.0\times10^3$
密 度			kg/m^3	≥1.6
电气强度			MV/m	≥35
(小线棒)介质损耗因数	常态		—	≤0.02
	热态 155℃		—	≤0.05

1.13.4 产品特点

B 级带包绕线圈经过处理成型固化后，具有良好的电气、力学性能，耐热等级 B 级。

1.13.5 适用范围和应用技术

B 级带采用环氧多胶粉云母带模压工艺，适用于 B 级高

压电机线圈主绝缘及其他各种电机、电器绝缘。

1.14 9543—1 F级整浸粉云母带

我国从20世纪70年代开始VPI绝缘体系的研究工作，鉴于当时国内的技术水平，缺乏少胶云母带和与之配套的浸渍树脂，20世纪80年代初，采用了折中的过渡办法，即中胶VPI绝缘体系。哈尔滨绝缘材料厂应当时中胶VPI绝缘体系的需求，研制并批量生产了9543—1F级整浸粉云母带（简称粉云母带）和9105F级无溶剂漆，广泛应用于高压中型电机机组中。

1.14.1 组成

粉云母带是以环氧树脂胶粘剂粘合粉云母纸，双面以玻璃布补强，经烘焙加工而成的。

1.14.2 物理、力学及介电性能

粉云母带的物理、力学和介电性能应符合表1.6-55规定。

表1.6-55 粉云母带的物理、力学及介电性能

指标名称	单位	指标值
外观		粉云母带不允许有外来杂质、粘连、分层和抽丝现象（但允许由于粉纸接头局部多胶引起的粘连、分层现象），胶粘剂分布均匀，粉云母纸不允许有断裂，并在常温（20℃±5℃）下应柔软
厚度	mm	0.14±0.02，个别值±0.03
盘径	mm	95±5、115±5
宽度	mm	25±1
边缘弯曲度	mm	≤1
管芯内径	mm	40±2
云母含量	%	≥40
胶含量	%	32～40
挥发物含量	%	≤3
拉伸力	N/10mm	≥100
电气强度	MV/m	≥35

1.14.3 热性能

粉云母带的热性能见表1.6-56。

表1.6-56 粉云母带的热性能

指标名称	指标值
耐热等级	F级

1.14.4 产品特点

粉云母带包绕线圈经处理成型固化后，具有良好的耐热、力学和电气性能，耐热等级F级。

1.14.5 适用范围和应用技术

粉云母带采用真空压力浸渍工艺，适用于F级高压电机整浸绝缘。

1.15 F级环氧玻璃聚酯薄膜粉云母带

20世纪80年代末，根据高压电机特殊部位和特殊性能的需求，哈尔滨绝缘材料厂研制出并批量生产了9546—1MF级桐马环氧玻璃聚酯薄膜粉云母带（简称三合一带）；为提高中型高压电机的介电强度，减薄绝缘厚度，哈尔滨绝缘材料厂于20世纪90年代自行开发了9546—1N F级环氧玻璃聚酯薄膜粉云母带（简称三合一带）。表1.6-57为三合一带的规格及型号。

表1.6-57 三合一带的规格及型号

型号	规格
9546—1M	0.14
9546—1N	0.12，0.14

1.15.1 组成

三合一带是以环氧树脂胶粘剂粘合粉云母纸，以玻璃布、聚脂薄膜为补强，经烘焙加工而成的。

1.15.2 物理、力学及介电性能

三合一带固化前的物理、力学性能和介电性能应符合表1.6-58规定。

表1.6-58 三合一带固化前的物理、力学及介电性能

指标名称	单位	指标值		
外观		不允许有外来杂质、粘连、分层和抽丝现象（但允许由于粉纸接头局部多胶引起的粘连、分层现象），胶粘剂分布均匀，粉云母纸－M不允许有断裂，并在常温（20℃±5℃）下应柔软		
厚度	mm	0.14±0.02，个别值±0.03	0.14±0.02，个别值±0.03	0.12±0.02，个别值±0.03
盘径	mm	95±5、115±5	95±5、115±5	95±5、115±5
宽度	mm	25±1	25±1	25±1
边缘弯曲度	mm	≤1	≤1	≤1
管芯内径	mm	40±2	40±2	40±2
云母含量	%	≥38	≥37	≥30
胶含量（%）	%	28～35	26～34	29～39
挥发物含量	%	≤2	≤3	≤3
薄膜含量	%	10～20	10～20	14～24
拉伸力	N/10mm	≥65	≥80	≥60
电气强度	MV/m	≥55	≥45	≥45

1.15.3 热性能

三合一带的热性能见表1.6-59。

表1.6-59 三合一带的热性能

指标名称	指标值
耐热等级	F级

1.15.4 产品特点

三合一带具有良好的电气、力学性能，耐热等级F级。

1.15.5 适用范围和应用技术

三合一带适用于绕组端部、连接线及F级交直流电机绕组主绝缘。

2 柔软云母板

柔软云母板在常温下具有良好的柔软性，可以任意弯曲而不破裂。从制造日期算起，其柔软性可持续3个月。用片云母时，分加补强材料和不加补强材料两种。用粉云

母时，必须加柔软性好的补强材料，以保证具有一定的机械强度。沥青或醇酸胶粘合的柔软云母板一般用于工作温度在 105～130℃的电机槽部和匝间绝缘。而以无碱玻璃布或聚酯薄膜为补强材料。环氧粘合粉云母纸的柔软云母板，具有良好的耐热性，电气强度高（实测值 704V/mm 以上，而 5131 仅 204V/mm），机械强度高，折弯后不易断裂，防潮性能好，受潮后电气性能比较稳定，主要用于防潮或机械强度要求高的 B 级高压电机线棒排间和换位垫块、槽部、端口、匝间及其他零部件绝缘。有机硅玻璃柔软云母板耐热性好，工作温度在 180℃以上，用于 H 级电机槽间绝缘及匝间绝缘。

柔软云母板产品，面积不小于 400mm×600mm，其厚度及允许公差见表 1.6-60，各种柔软云母板名称、型号、标准编号、组成、性能、用途见表 1.6-61。

20 世纪 80 年代，B 级柔软云母板已经满足不了高压电机机组所用材料的需求，为满足高压电机机组所用材料的需求，哈尔滨绝缘材料厂于 20 世纪 80 年代末，研制并批量生产了 F-4 柔软云母板（简称柔软云母板）。

表 1.6-60　　云母板的厚度及公差　　mm

制品类别	型　号	厚　度	公　差	
			平均值	个别值
柔软云母板	5130;5131	0.15	±0.04	±0.08
	5133;5135	0.20;0.25	±0.05	±0.12
	5150;5151	0.30;0.40;0.50	±0.07	±0.15
	5130—1;5131—1	0.15	±0.03	±0.05
	5136—1;5137—1	0.20;0.25	±0.04	±0.08
	5138—1;5151—1	0.30;0.40;0.50	±0.05	±0.10
塑型云母板	5230;5231 5235;5236 5250;9531	0.15;0.20;0.25	±0.05	±0.10
		0.30;0.40	±0.06	±0.12
		0.50	±0.07	±0.16
		0.60	±0.08	±0.18
		0.70	±0.09	±0.20
		0.80	±0.11	±0.22
		1.00	±0.14	±0.28
		1.20	±0.18	±0.32
换向器云母板	5535;5535—2 5560—2;9551	0.4～1.5 (间隔 0.05)	±0.04	±0.08
	5536—1	0.4～1.5 (间隔 0.05)	±0.03	±0.06
衬垫云母板	5730 5731 5755	0.5	±0.10	±0.18
		0.6	±0.12	±0.18
		0.7	±0.14	±0.20
		0.8	±0.16	±0.22
		0.9	±0.18	±0.22
		1.0	±0.20	±0.30
		1.5	±0.24	±0.40
		2.0	±0.30	±0.50
		3.0	±0.45	±0.75
		4.0	±0.60	±1.00
		5.0	±0.75	±1.25
	5755;5755-2	0.15	+0.05 −0.04	+0.10 −0.05
	5737—1	0.5～1.5(间隔 1.0)	±0.05	±0.10

表 1.6-61　　柔软云母板和塑形云母板的品种、组成、性能和用途

名　称	型　号	主要组成	耐热等级	介电强度 (MV/m，常态)				体积电阻率 (Ω·cm)		特性和用途
				厚 0.15mm	厚 0.2～0.25mm	厚 0.3～0.5mm	厚 0.6～1.2mm	常态	受潮 48h	
醇酸纸柔软云母板	5130	白云母>50%，醇酸漆 15%～30%，双面云母纸	B	15～28	20～30	15～26		$>10^{12}$	$>10^{10}$	用于低压交直流电机槽衬和端部层间绝缘及电器线圈的外包绝缘
醇酸纸柔软粉云母板	5130—1	粉云母>38%，醇酸漆 2%～45%，双面云母纸	B	16～35	18～25	>16				用于低压交直流电机槽衬和端部层间绝缘及电器线圈的外包绝缘
醇酸玻璃柔软云母板	5131	白云母>45%，醇酸漆 15%～30%，双面无碱玻璃布	B	16～20	18～25	16～22				用于一般电机槽衬和端部层间绝缘及电器线圈的外包绝缘
醇酸玻璃柔软粉云母板	5131—1	粉云母>38%，醇酸漆 25%～45%，双面无碱玻璃布	B	16～25	18～25	16～22		$>10^{12}$	$>10^{10}$	用于一般电机槽衬和端部层间绝缘及电器线圈的外包绝缘
沥青玻璃柔软云母板	5135	白云母>45%，沥青漆 15%～30%，双面无碱玻璃布	E	16～25	18～25	16～22		$>10^{12}$	$>10^{10}$	具有较高的耐潮性，但耐油性差，用于低压电机槽绝缘及匝间绝缘
环氧纸柔软粉云母板	5136—1	粉云母>38%，环氧胶 25%～45%，挥发物<3%双面云母纸	B	>16	>18	>16				用于高压电机定子线圈匝间和换位绝缘或其他衬垫绝缘

续表

名称	型号	主要组成	耐热等级	介电强度（MV/m，常态）				体积电阻率（Ω·cm）		特性和用途
				厚0.15mm	厚0.2～0.25mm	厚0.3～0.5mm	厚0.6～1.2mm	常态	受潮48h	
环氧玻璃柔软粉云母板	5137—1	粉云母＞40%，环氧胶15%～35%无碱玻璃布	B	＞25	＞30	＞30				用于低压电机槽绝缘和端部层间绝缘和外包绝缘
环氧薄膜玻璃柔软粉云母板	5138—1		B							用于高压电机定子线圈匝间和换位绝缘或其他衬垫绝缘
环氧玻璃聚芳酰胺薄膜柔软粉云母板	云139--1	粉云母30%，环氧聚酯10%～30%，聚酯薄膜与无碱玻璃布	B					$>10^{13}$	$>10^{12}$	用于高压电机定子线圈匝间和换位绝缘或其他衬垫绝缘
醇酸柔软云母板	5133	白云母＞65%，醇酸漆15%～35%	B	25～30	25～32	25～28		$>10^{13}$	$>10^{12}$	用于高压电机定子线圈匝间和换相绝缘或其他衬垫绝缘
有机硅柔软云母板	5150	白云母＞75%，有机15%～25%	H	＞20 16～26	＞25 18～28	＞20 16～26		$>10^{12}$	$>10^{10}$	用于H级电机槽部或端部层间绝缘
有机硅玻璃柔软云母板	5151	白云母＞45%，有机硅漆15%～30%，单面或双面无碱玻璃布	H					$>10^{12}$	$>10^{10}$	用于H级电机槽部或端部层间绝缘
有机硅玻璃柔软粉云母板	5151—1	粉云母＞40%，有机硅漆15%～30%，双面无碱玻璃布	H	＞15	＞25	20		$>10^{13}$	$>10^{12}$	用于H级电机槽部或端部层间绝缘
醇酸塑型云母板	5130	白云母75%～85%醇酸漆15%～25%	B	35～50 35～47	35～50 35～47	30～40 30～38		$>10^{13}$	$>10^{12}$	用于电机整流子V形环和电器绝缘结构件
虫胶塑型云母板	5231	白云母75%～85%，虫胶漆15%～25%	B	35～50	35～50	30～40	＞25	$>10^{13}$	$>10^{12}$	用于电机整流子V形环和电器绝缘结构件
醇酸塑型云母板	5235	白云母85%～92%，醇酸漆8%～15%	B	35～50	35～50	30～40	＞25	$>10^{13}$	$>10^{12}$	用于温升较高，转速较快的机整流子V形环和绝缘结构
虫胶塑型云母板	5236	白云母85%～92%，虫胶漆8%～15%	B	35～50	35～50	30～40	25～30	$>10^{13}$	$>10^{11}$	用于温升较高，转速较快的机整流子V形环和绝缘结构
有机硅塑型云母板	5250	白云母75%～85%，有机硅漆15%～25%	H				＞25			用于耐热电机、电器、仪表绝结构件
聚胺酰亚胺塑型云母板	9531	白云母片75%～85%，聚胺酰亚胺胶15%～25%，挥发物不多于3%	H	＞35	＞35	＞30	＞25	$>10^{13}$		具有成型温度低，结构坚牢易开裂，有分层，价格便宜，用于耐热电机

2.1 组成

柔软云母板是以胶粘剂粘合薄片云母，经烘焙、切割而成。

2.2 物理、力学性能及介电性能

柔软云母板的物理、力学及介电性能符合表1.6-62。

表1.6-62 柔软云母板的物理、力学及介电性能

续表

指标名称		单位	指标值
外观			边缘整齐、胶粘剂分布均匀，不允许有外来杂质、分层、云母片间存在漏洞的现象
尺寸	面积	mm^2	≥400mm×600mm
	厚度及公差	mm	平均值0.3±0.05，个别值0.3±0.12
			平均值0.4±0.07，个别值0.4±0.15
			平均值0.5±0.07，个别值0.5±0.15
云母含量		%	≥65
胶含量		%	15～35
挥发物含量		%	≤5
柔软性			无分层、剥片云母滑动、折损和脱落现象
电气强度		MV/m	≥25

2.3 产品特点

柔软云母板常态下具有柔软性，云母含量高，介电性能好，耐热等级 F 级。

2.4 适用范围和应用技术

将柔软云母板切成所需的尺寸，垫入所需的部位。适用于电机中作要求电性能高、抗潮性好的匝间、换位绝缘，亦可作电器、仪表的柔软衬垫。

3 塑型云母板

塑型云母板在常温下是硬质板状材料，加热时变软，继续加热、加压可以塑制成不同形状的绝缘构件，如绝缘筒、绝缘棒、盒和 V 形环等。要求成型件无分层、破裂、流胶，冷却后不再变形。以醇酸树脂胶和虫胶为粘合剂的塑型云母板在温度 110℃±5℃处理 15min；以有机硅树脂或聚胺酰亚胺胶为粘合剂的塑型云母板在温度 130℃±5℃下处理 15min 可以塑制成型。从出厂之日算起，储存期至少为 4 个月。

作为一般用途的塑型云母板，采用虫胶或醇酸树脂胶作为胶粘剂。对于耐高温的采用有机硅树脂胶或聚胺酰亚胺胶。

一般情况下，胶含量大的可塑性好，塑件形状规整。但片云母塑型云母板，胶含量过大将导致压制成型时流胶多，云母片滑动而影响性能，所以塑型云母板分多胶量和少胶量两类。

多胶量的塑型云母板，一般胶含量占制品重量 15%～25%。其制品有 5230 醇酸塑型云母板、5231 虫胶塑型云母板，它们适用于制作外形较复杂或一般用途的绝缘零部件。而 5250、9531 主要用作耐高温的绝缘零部件。

少胶量的塑型云母板，胶粘剂含量占制品重量 8%～15%。其制品有 5235 醇酸塑型云母板、5236 虫胶塑型云母板，适用于制作温升较高（如牵引电机和起重电机）或转速较快的绝缘零部件。

各种塑型云母板名称、型号、标准编号、组成、特性、用途见表 1.5-61。

作商品供应的塑型云母板，面积一般不小于 400mm×600mm，其厚度及公差见表 1.5-63。

为满足电机、电器 H 级材料的需要，哈尔滨绝缘材料厂于 20 世纪 70 年代研制并批量生产了 9531 单马来酰亚胺塑型云母板（以下简称塑型云母板）。

3.1 组成

塑型云母板是由单马来酰亚胺胶粘漆粘合薄片云母，经烘焙、压制、加工而成的硬质板状绝缘材料。

3.2 物理、力学及介电性能

塑型云母板的物理、力学及介电性能符合表 1.6-63。

表 1.6-63 塑型云母板的物理、力学及介电性能

指标名称		单 位	指 标 值	
外 观		…	塑型云母板应边缘整齐，胶粘剂应分布均匀，不允许有针孔、分层和外来杂质	
尺 寸		mm^2	≥400mm×600mm 面积小于上述规定的，可根据供需双方协议出厂	
厚度及偏差	标称厚度	mm	偏差平均值	偏差个别值
	0.15，0.20		±0.05	±0.10
	0.25		±0.06	±0.12
	0.3，0.4		±0.07	±0.16
	0.5		±0.08	±0.18
	0.6		±0.09	±0.20
	0.7		±0.11	±0.22
	0.8		±0.14	±0.28
	1.0		±0.18	±0.32
	1.2			
组成含量 云母 胶粘剂 挥发物含量		%	 75～85 15～25 ≤3	
可塑性，130℃±5℃下处理 15min			可塑制成管	
体积电阻率，常态		Ω·m	$\geqslant 10^6$	
电气强度 常态	标称厚度	MV/m		
	0.15～0.25		≥35	
	0.3～0.5		≥30	
	0.6～1.2		≥25	

3.3 产品特点

塑型云母板具有较高的耐热性，在一定温度下具有良好的可塑性。耐热等级为 H 级。

3.4 适用范围和应用技术

将塑型云母板切成所需的尺寸，垫入所需的部位。适于做各种 H 级电机、电器的管、环及其他形状的绝缘零件。

4 换向器云母板

换向器云母板主要是用作直流电机中的换向铜片间的绝缘垫片，除要求厚度均匀外，还应具备紧密度高，起层率小，在高温和高压下收缩率小，在快速运转下不流胶，云母片不滑动。为了保证直流电机安全运行，换向器云母板不应有导电杂质。一般均应通过耐电压检查：5535 耐电压值为 7kV/mm；5535—2，5536—1 为 9kV/mm。各种换向器云母板名称、型号、产品标准编号、组成、性能及用途见表 1.6-64。

换向器云母板最好采用金云母，其硬度比白云母小，磨损与铜相似。所以用金云母生产的 5532—2 换向器云母板，主要用于转速高或特殊的直流电机上。而用白云母片制造的 5535 换向器云母板，磨损比铜慢。如果这种云母板与铜装配成同样高度，在运转过程中，云母会突出于换向器表面，使换向器产生火花，并影响电刷的使用寿命。因此，用白云母板制成的换向器要采用下刻工艺。白云母片制造的 5535 换向器云母板用做一般直流电机换向片间的绝缘垫片。这种片云母板是采用小号片机械法生产的。由于厚度很不均匀，需经过铣、磨等加工工序校正云母板的厚度。

用环氧树脂漆粘合多层云母纸的换向器粉云母板，其型号为 5536—1。这种云母板厚度均匀，不需校正，制造工艺

简单，成本低，冲剪性好，粘合细密，耐潮性好，耐热性高，工作温度可达到130～150℃。其热态收缩率、流胶、滑片等均比片云母板要好。环氧粉云母换向器云母板由于折弯性稍差，主要用于中小型直流电机，也可用于湿热带和特殊用途的直流电机，还可代替5535用于汽车电机或牵引电机。5536—1换向器云母板磨损系数虽比白云母大，但仍比铜小，在换向器制造过程中仍需下刻。

用聚胺酰亚胺粘合白云母片的换向器云母板具有耐高温，结构坚牢，整体性好，特别是成本低、价格便宜，适用于B、F、H级换向器绝缘，但易吸湿，包装需严密。

表1.6-64 换向器云母板品种、组成、性成和用途名称

名称	型号	主要组成	耐热等级	电气强度(MV/m)	体积电阻率(Ω·m)		收缩率不大于(%)压力58.8MPa		起层率(%)试样厚度与面积(mm)		主要用途
				(常态)	常态	受潮24h	20±5℃	160±5℃	0.4～0.65 200×400	0.7～1.0, 200×400	
虫胶换向器云母板	5535	白云母＞94% 虫胶漆＜6%	B	18～35	—	—	7① 9	1.4	5	10	用于一般直流电机换向器绝缘
虫胶换向器金云母板	5535—2	金云母＞94% 虫胶漆＜6%	B	＞18	—	—	7① 9	1.4	5	10	用于一般直流电机换向器绝缘
环氧换向器粉云母板	5536—1	粉云母纸＞90%，环氧树脂漆＜10%	B	20～40	—	—	9	2.5	3	5	用于汽车电机和其他小型直流电机换向器绝缘
磷酸铵换向器云母板	5560—2	金云母，磷酸铵	H	＞18	5×10^{10}	5×10^{8}	10	1.0	10	10	用于耐高温电机换向器绝缘
聚胺酰亚胺换向器云母板	9551	聚胺酰亚胺胶不大于6%，白云母不大于4%	H	＞18	—	—	9	2.5	5	5	用于耐高温电机换向器绝缘

① 厚度为0.7mm以上云母板的收缩率。

用磷酸铵无机粘合剂粘合金云母片的换向器云母板，耐热性高，热态变形小，有较好的介电性能。其原理是金云母在适当的热处理和受压下与磷酸盐化合，形成一种硬质板。这种云母板广泛使用在工作温度为180℃及180℃以上的直流电机。

换向器云母板的一般制造面积不小于250mm×500mm，其中允许面积不小于200mm×300mm的占总重5%以下。

20世纪70年代末，为满足H级直流电机换向器铜片间绝缘要求，哈尔滨绝缘材料厂研制并批量生产了9551单马来酰亚胺换向器云母板。

4.1 组成

换向器云母板是由单马来酰亚胺胶，粘合云母片，经烘焙、压制、加工而成的硬质板状绝缘材料。

4.2 物理、力学及介电性能

换向器云母板的物理、力学及介电性能应符合表1.6-65规定。

表1.6-65 换向器云母板物理、力学及介电性能

指标名称	单位	指标值	
外观	—	边缘应切割整齐，不允许有针孔和外来杂质，不允许出现表面云母片翘起，起泡和边角分层现象	
尺寸	mm^2	≥250mm×500mm 允许面积不小于200mm×300mm的占总重量的50%以下，面积小于上述规定的，根据双方协议出厂	
厚度和偏差，标称厚度 0.4～1.5	mm	偏差平均值 ±0.04	偏差个别值 ±0.08

续表

指标名称	单位	指标值
组成含量 云母 胶粘剂 挥发物	%	 ≥94 ≤6 ≤1
光滑度(180℃±5℃，59.8MPa)	—	边缘不允许有胶滴挤出和薄片云母滑出
弹性压塑(20℃±5℃，59.8MPa；180℃±5℃，59.8MPa)	%	≤9 ≤2.5
起层率(标称厚度 0.4～0.65 0.7～1.0 1.1～1.5	%	 ≤5 ≤10 无规定
电气强度(常态)	MV/m	平均值 ≥18　　个别值 ≥14

4.3 产品特点

换向器云母板具有较好的机械强度，并有厚度均匀，收缩率小等特点，耐热等级为H级。

4.4 适用范围和应用技术

将换向器云母板切成所需的尺寸，垫入所需的部位，适用于H级直流电机换向器的铜片间绝缘。

第 7 章 薄膜、胶粘带及复合材料

1 电工聚丙烯薄膜

19 世纪 60 年代前期，聚丙烯薄膜问世。由于它具有良好的透明性，光泽性、质轻，因而被广泛用作包装材料。到 19 世纪 60 年代后期，它被成功地用作电力电容器介质。经与各种塑料薄膜相比较，已被国际公认为当前最理想的电力电容器介质。

聚丙烯薄膜用树脂系等规立构均聚物，它的等规度不小于 95%，熔体指数 1.5～4。树脂中添加剂的品种和含量对薄膜的介电性能有一定影响，可按用途不同来选择。

电工用双轴拉伸聚丙烯薄膜（BOPP）用平膜法或管膜法制造。

1.1 组成

聚丙烯薄膜是以均聚型聚丙烯树脂为原料，经挤出拉伸取向后，制成的双轴定向薄膜材料。

1.2 物理性能

聚丙烯薄膜的物理性能、空隙率、浊度要求列于表 1.7-1～表 1.7-3，温度对薄膜收缩率的影响如图 1.7-1 所示。

表 1.7-1 聚丙烯薄膜的物理性能

指标名称	单 位	指 标 值
密 度	g/cm^3	0.905±0.005
熔 点	℃	165～175
空隙率	%	见表 1.7-2
浊 度	%	见表 1.7-3
表面粗糙度 R_a	μm	0.25～0.65

表 1.7-2 聚丙烯薄膜空隙率

标称厚度（μm）	平均值（%）	最高值（%）	最低值（%）
4.0～12.0	9.0±3.0	≤15	≥5.0
>12.0～25.0	10.0±3.0	≤17	≥5.0

表 1.7-3 聚丙烯薄膜浊度

标称厚度（μm）	平均值（%）	最高值（%）
4.0～12.0	≥18	
>12.0～15.0	≥30	≥24
>15.0～25.0	≥35	≥25

表面粗化聚丙烯薄膜的厚度和空隙率对浊度的关系如图 1.7-2 所示。不同厚度的粗化聚丙烯薄膜的浸油高度与浸油时间关系如图 1.7-3 所示。粗化薄膜的浊度对油柱上升高度的关系如图 1.7-4 所示。

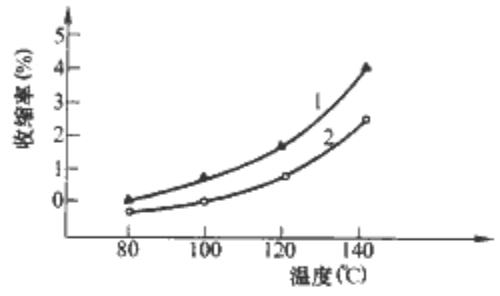


图 1.7-1 聚丙烯薄膜收缩率与温度关系图
1—纵向；2—横向

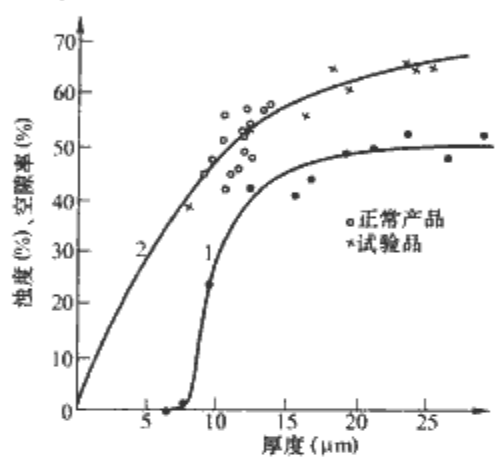


图 1.7-2 厚度为 19.5μm 粗化聚丙烯薄膜空隙率、厚度与浊度的关系
1—空隙率影响；2—厚度影响

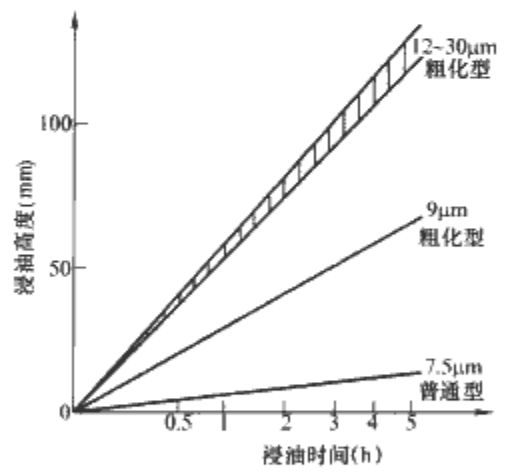


图 1.7-3 不同厚度粗化聚丙烯薄膜的浸油高度与浸油时间关系

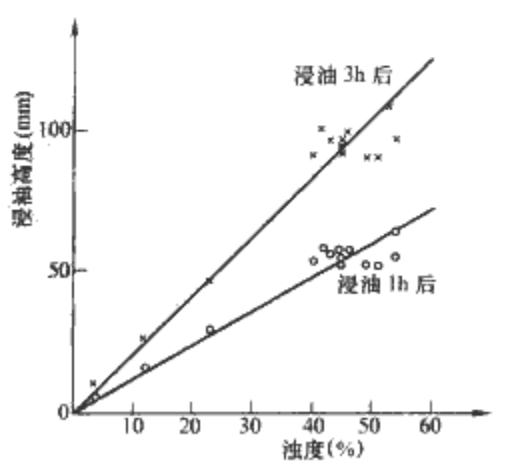


图 1.7-4 粗化薄膜的浊度对浸油高度的关系

1.3　电气性能

表 1.7-4～表 1.7-7 列示了聚丙烯薄膜的电气性能，聚丙烯薄膜属非极性介质，因此它显示出的低介电性能和低介质损耗因素。温度、频率对聚丙烯薄膜介质损耗因素的影响分别如图 1.7-5 和图 1.7-6 所示。温度对聚丙烯薄膜的绝缘电阻、电容量的关系如图 1.7-7 和图 1.7-8 所示。

表 1.7-4　　聚丙烯薄膜电气性能

指标名称		单位	指标值
直流介电强度	元件法	V/μm	见表 1.7-5
	50 点电极法		见表 1.7-6
体积电阻率		Ω·m	≥1.0×10^{15}
介质损耗因素 23℃±2℃	48～62Hz	—	≤3.0×10^{-4}
	1.0kHz		
相对介电常数 23℃±2℃	48～62Hz	—	2.2±0.2
	1.0kHz		
电弱点		个/m²	见表 1.7-7

表 1.7-5　　聚丙烯薄膜直流介电强度（元件法）

标称厚度 (μm)	中值 (V/μm)	最低值（21 个结果中允许有一个低于规定值） (V/μm)
4.0	≥100	≥40
5.0	≥130	≥60
6.0	≥170	≥80
7.0	≥210	≥100
8.0	≥230	≥120
9.0	≥250	≥130
10.0	≥270	≥145
12.0	≥280	≥155
13.0	≥280	≥160
14.0	≥290	≥160
15.0	≥300	≥165
16.0	≥290	≥170
17.0	≥280	≥170
18.0	≥280	≥175
19.5	≥280	≥180
20.0	≥280	≥180
22.0	≥280	≥180
25.0	≥280	≥180

表 1.7-6　　聚丙烯薄膜直流介电强度（50 点电极法）

标称厚度 (μm)	中值 (V/μm)	最低值 (V/μm)
4.0，5.0，6.0，7.0	≥340	≥250
8.0，9.0，10.0	≥400	≥300
12.0，13.0，14.0	≥420	≥320
15.0，16.0，17.0	≥470	≥370
18.0，19.5，20.0	≥470	≥370
22.0，25.0	≥440	≥340

表 1.7-7　　聚丙烯薄膜电弱点

标称厚度（μm）	指标值（个/m²，测试电压 200V/μm）
4.0	≥2.5
5.0	≥2.2
6.0	≥1.8
7.0	≥1.5
8.0	≥1.0
9.0	≥0.8
10.0	≥0.6
≥12.0	≥0.5

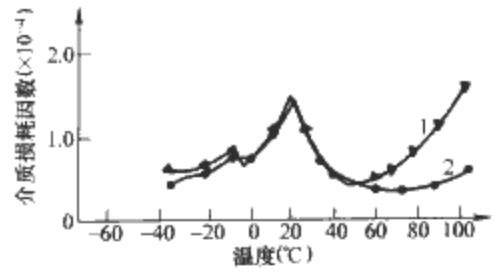


图 1.7-5　聚丙烯薄膜介质损耗因数与温度的关系
1—50Hz；2—10^3Hz

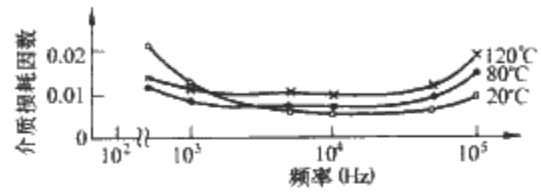


图 1.7-6　各温度下聚丙烯薄膜介质损耗因数与频率的关系

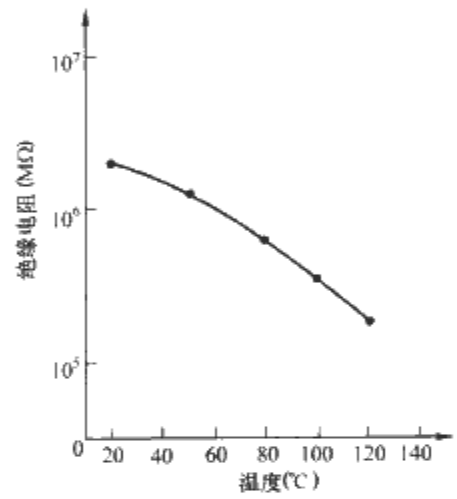


图 1.7-7　聚丙烯薄膜绝缘电阻与温度的关系
（12μm，单层 0.5pF，100V 直流充电时间 1min 平衡时间 2min）

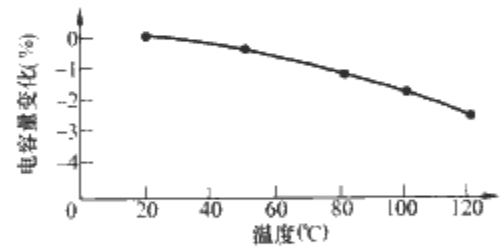


图 1.7-8　聚丙烯薄膜电容量与温度的关系
（12μm，0.22μm）

1.4　力学性能

聚丙烯薄膜的力学性能列示于表 1.7-8。以厚度为 25μm 的聚丙烯薄膜为例，在不同温度下的拉伸强度与伸长率的关系如图 1.7-9 所示。平膜法（逐次双轴拉伸）与管膜法（同时双轴拉伸）纵横拉伸强度伸长率的关系如图 1.7-10 所示。

表 1.7-8　　聚丙烯薄膜力学性能

指标名称		单位	指标值
拉伸强度	纵向	MPa	≥120
	横向		≥130
断裂伸长率	纵向	%	≥40
	横向		≥30

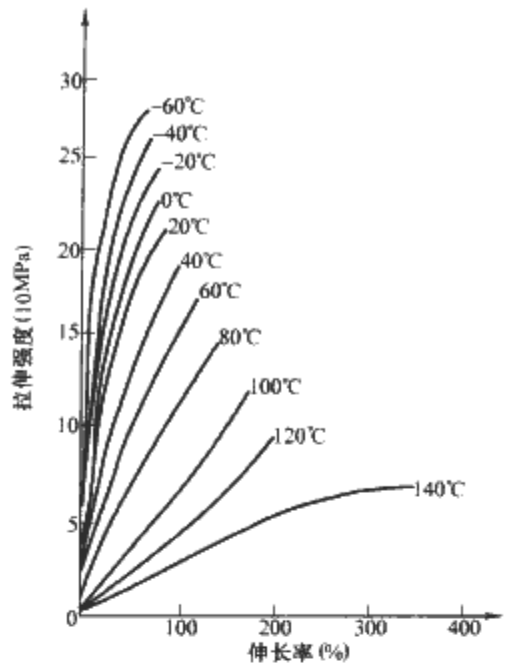


图 1.7-9 厚 25μm 聚丙烯薄膜在不同温度下的拉伸强度与伸长率的关系

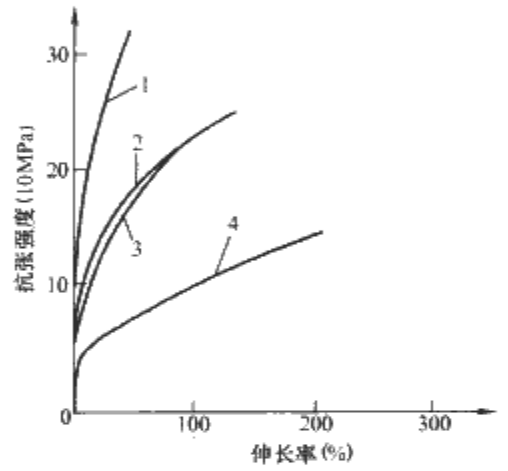


图 1.7-10 平膜法与管膜法聚丙烯薄膜拉伸强度与伸长率关系

1—平膜法横向；2—管膜法横向；3—管膜法纵向；4—平膜法纵向

1.5 产品特点

聚丙烯薄膜具有较好的电气、力学性能，介质损耗因数小，而且损耗的温度系数小，低的收缩率，再加上高熔点和非常良好的耐油性，是目前综合性能最理想的电容器介质材料。电工用聚丙烯薄膜有普通型、粗化型和金属化型等。粗化型薄膜是在拉膜过程中，对薄膜进行单面或双面表面粗化处理，使多层薄膜层间具有毛细作用，易于浸渍液体介质；金属化型薄膜是在普通型薄膜表面真空镀铝；聚丙烯薄膜厚度规格在 2～60μm 之间，最高工作温度为 105℃。

1.6 适用范围和应用技术

聚丙烯薄膜广泛用于高压电力电容器、电讯电容器、整流电容器、干式电容器及电容式话筒的柱极体（见表 1.7-9）。表面粗化聚丙烯薄膜可做全膜电容器，它还可做电缆绝缘带及相间绝缘等其他用途，普通型薄膜与电容器纸合用制造电力电容器，金属化型薄膜用于制造各类低压电容器或用来制造复合金属箔。

表 1.7-9 聚丙烯电容薄膜的适用范围

类型	代号	型号	特 征	用 途
电晕处理光面膜	MP	6014	薄膜表面经电晕处理成为对金属有良好吸附力的电介质，具有优异的力学性能和电气性能	可根据使用要求在薄膜表面镀上一层金属或多层金属复合层，金属化自愈式电容器的基膜
光面膜	SP	6011	薄膜有两个表面均不经电晕处理，厚度均匀，介电性能好	电子电容器、膜纸复合介质电容器的介质材料
单面粗化膜	RP	6012	采用特殊的工艺方法在薄膜的一个表面进行粗化处理，与多种绝缘油相溶性好，溶胀小	膜纸复合介质电容器，也可用于全膜介质电容器，是中高压电力电容器的介质材料
双面粗化膜	RRP	6013	采用特殊的工艺方法在薄膜的两个表面进行粗化处理，与多种绝缘油相溶性好，溶胀小，浸渍性能和电气性能优越	输变电系统中高压、大功率全膜介质电力电容器良好的介电材料，例如：用于集合式并联电容器、电热电容器、电容分压器、电容式电压互感器、高低压无功补偿装置等产品的配套介质材料
电晕处理粗化膜	MRP	6015	电晕处理面可蒸镀金属层作为电容器的电极，粗化处理面易于绝缘油的渗透	浸渍型自愈式电容器的基膜，是电压等级较高的高储能密度电容器的介质材料
锌铝复合金属化膜	MPP-Al/Zn		薄膜的一个表面镀上了一层极薄的锌铝复合金属层，极薄的金属层具有很好的自愈性，镀层均匀，附着力强，抗氧化性能好，损耗值小。金属镀层边缘加厚时，导电性能更佳	适用于功率较大和容量稳定性要求较高的自愈式电容器，电力电容器
铝金属化膜	MPP-Al		薄膜的一个表面镀上了一层铝金属层，具有良好的导电性和自愈性，不易氧化而宜于存放。镀层均匀性好，附着力牢，优异的力学性能和电气性能	自愈式电容器、小型电子电容器的主要材料

2 聚酯薄膜

聚酯薄膜（BOPET）是以聚对苯二甲酸乙二酯为原料，经挤出拉伸取向后，制成双轴定向薄膜材料。近年来，随着电工绝缘材料以及其他工业用材料的日益发展，各国正在大力发展塑料薄膜的成型加工及其设备制造技术。它的发展趋势是大型、高速、自动化，从而达到节能、提高生产效率，降低成本，提高质量的目的。

2.1　透明或半透明聚酯薄膜

2.1.1　各项性能

透明或半透明聚酯薄膜的各项性能见表 1.7-10。

表 1.7-10　　透明或半透明聚酯薄膜的各项性能

指标名称		单位	指标值	
拉伸强度（纵向及横向）		MPa		
标称厚度（μm）	25～100		≥150	
	>100～190		≥140	
	>190		≥110	
断裂伸长率（纵向及横向）		%		
标称厚度（μm）	25～50		≥60	
	>50～350		≥80	
收缩率（纵向及横向）		%		
标称厚度（μm）	25～190		≤3.0	
	>190		≤2.0	
工频电气强度		V/μm	—	
体积电阻率		Ω·m	$\geqslant 1.0\times10^{14}$	
相对介电常数（50Hz）		—	2.9～3.4	
介质损耗因数（50Hz）		—	$\leqslant 5.0\times10^{-3}$	
密度		kg/m³	透明	半透明
			1390±10	1400^{+10}_{20}
熔点		℃	≥256	
表面电阻率		Ω	$\geqslant 1.0\times10^{13}$	
电解腐蚀	目测法	级	A_1	
	金属导线拉伸强度法	%	≤2	
高温下尺寸稳定性	拉力下	℃	≥200	
	压力下			
长期耐热性（温度指数）		—	≥115	

2.1.2　工频电气强度

聚酯薄膜的工频电气强度列于表 1.7-11。

表 1.7-11　　聚酯薄膜的工频电气强度

标称厚度（μm）	指标值（V/μm）
25	≥170
50	≥130
75	≥105
100	≥90
125	≥75
150	≥70
188	≥65
250	≥60
300	≥55
350	≥50

聚酯薄膜的力学性能几乎是目前各种塑料薄膜中最突出的，它在很宽的温度范围内［（－70～150)℃］能保持良好的力学性能。相对湿度的变化对它的力学性能似乎没有什么影响。

聚酯薄膜的特点之一是它不仅在室温下而且在很宽的温度范围内仍能保持物理机械性能。如薄膜在（－50～30)℃间能保持良好的撕裂强度、冲击强度，可以认为聚酯薄膜可应用于长期处在低温下运行的电机、电器中。如将聚酯薄膜在沸水中煮 30min 后，其拉伸强度和伸长率无明显变化。聚酯薄膜在高温下收缩率大小，取决于薄膜的厚度、温度和持续时间。可长期在 120℃下应用，属 E 级绝缘材料。

聚酯薄膜除了有突出的力学性能外，在宽的温度和湿度范围内还具有高的介电强度、体积电阻率和表面电阻率。它的介电强度往往受电极尺寸和形状、环境温度湿度、试样厚度和升压速度的影响。

聚酯薄膜能耐许多化学药品和溶剂的腐蚀，不溶于常用的有机溶剂，不受甲醇、乙醇、环己酮、丙酮、冰醋酸等的浸蚀。它溶于苯酚和甲酚，这两种溶剂会降低聚酯薄膜的物理性能。许多种浸渍漆、灌注胶及常用的绝缘油对聚酯薄膜性能几乎没有明显影响。它的耐酸性能良好，耐碱性能略差。

2.1.3　透明或半透明聚酯薄膜的应用

由于透明或半透明聚酯薄膜厚度薄，力学性能、介电性能、耐热性的优异及低吸湿性等特点，是中小型电机比较理想的槽绝缘材料。若与聚酯纤维非织布复合或聚芳酰胺纤维纸复合可分别作 B 级或 F 级槽绝缘，也有选用厚度为 100～250μm 薄膜直接作电机槽绝缘。采用聚酯薄膜作槽绝缘材料，可以提高电机的槽满率或缩小体积，提高容量，简化制造工艺，提高电机运行的可靠性等。

利用聚酯薄膜吸水性低，耐热性好，尺寸稳定，并能耐矿物油，可用厚度 12～25μm 的透明或半透明聚酯薄膜带，单面或双面涂以热固性好的胶，做多芯电缆的绑扎带，也可做聚乙烯绝缘电缆与聚氯乙烯套之间的隔热层或防止增塑剂迁移的隔离层。它在多芯电缆中编织金属护套之前做防护层。也可将透明聚酯薄膜蒸镀金属后，直接做电缆的屏蔽套。另外，它还可做带状电缆的绝缘层。

将铜箔热压在涂有聚乙烯的聚酯薄膜上，可制成软印刷线路。聚酯薄膜还可作录音、录像用磁带基材，感光胶片基材，绝缘压敏带带基。由于聚酯薄膜不含增塑剂及含水量极小，非常适用于真空蒸镀金属，可作装饰用金银线。把聚酯薄膜表面粗化后，可作高级制图材料，它还可用于制版、脱模及标签。若用其他薄膜复合后可作包装用薄膜材料。

2.2　阻燃聚酯薄膜

随着塑料工业的发展，塑料及其制品在建筑、交通、航空、电器、家具、日用品等各个领域得到了越来越广泛应用。但是，由于许多塑料不仅容易燃烧，而且在燃烧时还会释放出有毒、有害的气体，严重损害人们身体健康，甚至造成死亡。在国际上，由于塑料燃烧事故造成的损失和危害已成为严重的社会问题。研究塑料的阻燃问题已被世界各国高度重视。

聚酯薄膜早在 20 世纪 50 年代问世以来，到现在得到迅猛发展。随着聚酯薄膜应用领域的扩大，特别在电机电器行业领域，根据世界环保组织和欧盟指令的要求，普通聚酯薄膜由于其在电机电器安全性不够，世界各国开始对薄膜阻燃性开始进行研究，20 世纪 80 年代国外日本帝人、美国杜邦、日本东丽等几家国外知名企业首先对聚酯薄膜进行阻燃改性研究，产品获得了美国 UL 实验室安全认证。四川东方绝缘材料有限公司在 20 世纪 90 年代末期，开发出了阻燃聚酯薄膜，在国内同行业中首先通过美国 UL 实验室认证。到本世纪初国内切片生产厂对普通聚酯切片阻燃性进行了改进，切片阻燃性得到很大提高，阻燃聚酯薄膜得到了蓬勃

发展。

2.2.1 性能特点

目前阻燃聚酯薄膜一般采用环保型阻燃剂切片生产，与常规卤系阻燃剂相比，产品具有阻燃性高，长期工作中无阻燃剂析出，并且燃烧释放毒性气体少，对环境无污染等优点。

力学性能：在聚酯大分子中引入阻燃剂后，使聚酯的结晶速率降低，因此阻燃聚酯薄膜的断裂伸长率有一定的提高。为了保持较高的拉伸强度，可在工艺上采取增加取向度的措施进行解决。

电气性能：加入适量阻燃剂对薄膜的工频电气强度、体积电阻率、相对介电常数、介质损耗因素均无明显影响，全部达到 IEC 国际电工委员会绝缘材料标准要求。

氧指数：未经阻燃改性的普通聚酯薄膜氧指数一般在 20%～22%，经阻燃改性后的聚酯薄膜氧指数在 26%以上，阻燃等级达到 94VTM—2，甚至 94VTM—0。

阻燃性：按照美国 UL 垂直燃烧的实验方法，普通聚酯薄膜会在 3s 内全部点燃，并伴随有较浓的烟雾和引燃位于实验装置下面的脱脂棉，而添加了阻燃剂的阻燃聚酯薄膜几乎不会被点燃。94VTM—2 阻燃等级是指在 3s 内薄膜部分被点燃，燃烧时烟雾小，部分引燃脱脂棉；94VTM—0 阻燃等级是指在 3s 内薄膜部分不能被点燃，当然没有烟雾释放，也不会引燃脱脂棉。

2.2.2 应用

阻燃聚酯薄膜主要用于进出口电机电器绝缘、建筑装饰材料以及天气寒冷地区取暖工程等对制品安全有要求的领域。

2.3 录音、录像带用聚酯薄膜

在聚酯薄膜上，涂以含有阴离子基的聚氨酯水溶液及阴离子基聚酯的水溶液，然后经拉伸，再沉积电子束固化的磁性涂料，可以制成磁带、磁卡片和磁盘等，与磁性涂料附着力良好。

2.3.1 录音、录像带对带基及其树脂的要求

录音、录像带产品的不断更新换代，不仅体现了磁带制作技术的不断改进，而且还体现了磁性材料和带基材料的技术进步。新一代录像带带基正是使用了超平滑的聚酯薄膜。超平滑的聚酯薄膜所用的原料是超高纯超高清洁度的高性能聚酯树脂。

聚酯树脂不但具有录音录像带所需要的优良性能，而且价格相对低廉。PET 树脂也因为它在录音、录像带中所扮演繁荣重要角色而“身价”倍增。磁带带基用 PET 薄膜是 PET 树脂所制成的产品中附加值较高的产品之一。PET 树脂用双轴拉伸法可制成厚度只有 0.5μm 的超薄型薄膜，还可制成拉伸强度为 869MPa 杨氏模量为 14 500MPa 的特种超级强化膜。

不同记录密度、不同类型的录音录像带，因它们的性能和制造工艺不同而被设计成不同的结构。就制造工艺而言，磁带有涂布型和蒸镀型两种结构。对涂布型磁带而言，带基、磁粉、胶粘剂是其 3 大原材料。

带基是录音、录像带的骨架，不同类型的磁带对其骨架有着不同的要求。各类型磁带的带基，在表面粗糙度即表面凹凸程度上和机械强度上差别很大。一般磁带带基表面越平滑，即粗糙度越小，则越有利于电磁性能，而越不利于走带性能。如果要同时兼顾电磁性能和走带性能，那么带基的表面粗糙度就应取一个不大不小的妥协值。这就是 N—型标准磁带带基。为了获得更高的图像质量，录像带带基的表面粗糙度还要更低一些，此时，走带性能更趋于恶化。所以高画质录像带都采用具有润滑性能、减摩性能的背层结构来改善走带性能。具体来说，HG 级以上的高性能磁带，都要采用低表面粗糙度的，即平滑或超平滑的带基，同时还要采用背层结构。所以，带基性能的变化，引起了磁带结构设计上的改变。反之，不同结构的磁带，要求不同性能的带基。随着记录密度不断的提高，录像带的厚度也不断薄型化。录音录像带厚度的降低，主要靠减少带基的厚度。带基的薄型化程度完全取决于带基的高模量高强化程度。所以，超薄型高密度录音录像带的带基，除了具有低表面粗糙度外，还必须是高模量的超强化膜。也就是说，高密度的磁带必须使用超低表面粗糙度、超高强化膜。

不同类型的磁带需要不同的带基（见表 1.7-12），不同的带基同样需要不同的原料树脂（见表 1.7-13）。所以，选择录音、录像带用树脂的根据是磁带对其带基的要求，是磁带带基应具备的性能。当然，树脂的选择还要考虑带基成型加工工艺的特殊需要。

表 1.7-12 磁带工艺对带基的要求

制造工艺	带 基 要 求
涂布高速化	连续长度更长，厚度公差更小，尤其是横向
磁层薄型化	在整卷长度范围内，表面平整，无皱纹，无缺陷，（在线检查）并且输送合理化
蒸镀、溅射工艺	表面粗糙度更低，并且耐擦伤

表 1.7-13 磁带带基及其树脂性能关系

带基的特性	理想的方向	带基特性与理想方向相反时磁带的性能	理想的带基用树脂
断裂强度	大	断裂	高纯化、稳定化、高清洁度、易拉伸树脂
伸长率	小	图像跳动	
杨氏模量	大	磁带弯曲、头带接触不良，S/N 和输出下降	
热收缩	小	在高温下使用、保存时图像扭曲、偏移	耐热性树脂
热膨胀系数	小(固定磁头)	因温度变化而产生图像扭曲、磁迹偏移	树脂配方合理，结晶性能满足要求，易于拉伸
吸湿膨胀	小	因湿度差而产生图像扭曲	
泊松比	小	横向尺寸波动	
厚度公差	小	涂布不均、产生皱纹、产生 DO	
膜卷偏移	无	涂布不均、产生皱纹、分切不良	
表面粗糙度	小	信号失落，S/N 和输出下降	高纯、高清洁度树脂
	大	走带性能差	含适量的惰性添加剂
摩擦系数	小	走带性能差	
磨 损	小	反复使用时 DO 增加	含适量的惰性添加剂
表面电阻	小	吸尘，涂布不均	抗静电树脂
粘附性	大	磁层脱落	含添加剂
擦 伤	无	产生 DO，噪声增加	耐磨树脂
针孔气孔	无	涂布液无污染	高清洁度树脂
齐聚物价值	无	产生 DO，涂布不均	高纯树脂
	便宜	增加磁带成本	大规模生产

当代的录音、录像带正朝着高密度、高画质、高可靠性、小型轻量化及长时间工作的方向不断发展。这对带基提出了新的挑战。在录音、录像带高性能化的同时，磁带的制造工艺也获得了新的改善。

2.3.2　录音、录像带带基用 PET 树脂的特性

录音、录像带的性能将影响其音像质量。优质的带基是制成优质录音录像带的先决条件。制造优质的磁带带基，不仅需要性能良好的设备和先进的制膜工艺技术，而且还必须使用优质的带基原料树脂。

原料树脂会直接影响带基薄膜的成型加工性能及薄膜的最终性能。录音、录像带的某些性能实际上直接与树脂性能有关。表面粗糙度就是最典型的一项。一旦树脂的配方确定，就意味着带基的表面粗糙度也基本确定。除了用带基表面粗糙度来表征该配方的树脂外，任何树脂特性都不能直接反映该配方是否适用，或适用于哪一种录音、录像带。所以，树脂的性能必须借助于薄膜的性能才能反映出来，类似的性能还有摩擦和磨损性等。

磁带带基是树脂深加工产品。随着成型加工技术的进步，PET 薄膜生产已趋于高速化、宽幅化和大容量化。为了适应这种趋势，具有良好成型加工性能的树脂应运而生，即磁带带基用树脂（见表 1.7-14）要满足带基成品膜性能的需求。

表 1.7-14　录音录像带带基用 PET 树脂特性

性　能	单　位	要　求
特性黏度	dl/g	0.65
熔　点	℃	≥260
二甘醇含量	%	0.4～1.2
清洁度	t/m^2	>100
熔体电阻率 ρ	Ω·m	$(2\sim9)\times10^5$
表面粗糙度 R_a	μm	0.003～0.020
摩擦系数	—	<0.45
表面齐聚物含量	mg/m^2	15～17

2.3.3　磁带带基用 PET 树脂存在的问题

录音、录像带的带基大多数是 PET 树脂，尤其是高密度录音、录像带带基，还存在一些技术问题难以解决。最突出的是杨氏模量以及耐热性不够高，表面齐聚物相对多一些。这几项性能不理想将会给高密度磁带质量带来严重的影响。

2.4　行输出变压器用聚酯薄膜

行输出变压器用聚酯薄膜主要用于电视机和终端显示器的一体化行输出变压器上，具体应用于线圈间起绝缘作用。

2.4.1　一般要求

薄膜表面应平整光洁，不应有折皱、撕裂、颗粒、气泡、针孔和外来杂质等缺陷，薄膜边缘应整齐无破损。分切成盘时端面应整齐，手感光滑，无卷边，无毛刺、良好的阻燃性（UL94VTM—2）、较好的尺寸稳定性和良好的物理力学性能。

2.4.2　主要性能参数

行输出变压器用聚酯薄膜的主要性能参数列于表 1.7-15。

表 1.7-15　行输出变压器用聚酯薄膜的各项性能

指　标　名　称		单　位	指　标　值
拉伸强度（纵向及横向）		MPa	≥170
断裂伸长率（纵向及横向）		%	≥110
收缩率	纵　向	%	≤0.8
	横　向		≤0.2
工频电气强度		MV/m	≥150
体积电阻率		Ω·m	$\geq1.0\times10^{14}$
相对介电常数（50Hz）		—	3.2±0.2
阻燃性		—	UL94VTM—2
宽度偏差		mm	±0.2

2.4.3　特点

行输出变压器用聚酯薄膜的主要特点体现在较好的尺寸稳定性、良好的阻燃性、良好的物理力学性能以及较高的加工精度，其次是该产品必须具有一定的透明度。

2.4.4　主要规格

市场主要应用 0.075mm 和 0.10mm 两种厚度的行输出变压器用聚酯薄膜产品，宽度范围主要在 25～45mm。

2.5　薄膜开关聚酯薄膜

该聚酯薄膜是用于薄膜开关、柔性印刷电路（FPC）等领域，具有优良的电气绝缘性能，低收缩率和优异尺寸稳定性是它的一大特点，可满足精密印制电路的需要。良好的力学强度、较高的回弹性能满足各种柔性薄膜开关电路层的要求。表 1.7-16 列示了薄膜开关聚酯薄膜的主要性能。

表 1.7-16　薄膜开关聚酯薄膜主要性能

指　标　名　称		单　位	指　标　值
拉伸强度（纵向及横向）		MPa	
标称厚度（μm）	50～100		≥150
	>100～150		≥140
断裂伸长率（纵向及横向）		%	
标称厚度（μm）	≥75		≥80
	<75		≥60
收缩率	纵　向	%	≤0.8
	横　向		≤0.3
浸润张力		mN/m	≥40

2.6　亚光聚酯薄膜

亚光聚酯薄膜主要是通过特殊的加工工艺使薄膜表面粗化达到亚光的效果，亚光聚酯薄膜主要用于家具脱膜和标签等领域。在家具脱膜领域，主要用于中低档家具，用该产品脱膜后的板材外观平整、反光弱、不耀眼、板材表面产生舒适柔和的视觉效果，满足了现代家具健康、环保的要求；其次是用于制作各标签和广告，该亚光聚酯薄膜产品经表面处理后可在其表面印刷各种文字和图案，大量用于商品包装和商品宣传。

2.6.1　主要性能

薄膜表面应平整光洁，不应有折皱、撕裂、颗粒、气泡、针孔和外来杂质等缺陷，薄膜边缘应整齐无破损，DT20 亚光聚酯薄膜具有较低的光泽度、较高的机械强度、尺寸稳定性、热稳定性和耐化学腐蚀性。其中最主要的技术指标是产品的亚光性好，即产品的表面光泽度小。“光泽”

一词（有时称为光彩或光辉）是用来描述面的视觉物评价结果。镜面光泽度——试样在镜面方向的相对发光反射比率。而发光反射比率——从试样上以固定角度反射的光与入射光之比。对于光滑平整的试样表面，发光反射比率较高，几乎没有漫反射，反之对于粗糙的试样表面，发光反射比率较低，入射光当中的一部分呈漫反射并以不同的角度反射了。光泽度的测试采用 ASTMD2457《塑料薄膜镜面光泽度标准测试方法》。表 1.7-17 列示了亚光聚酯薄膜的主要性能参数。

表 1.7-17　　亚光聚酯薄膜的各项性能

指标名称	单　位	指　标　值	
		45～75μm	>75～125μm
拉伸强度(MD/TD)	MPa	≥160	≥140
断裂伸长率(MD/TD)	%	≥100	≥110
收缩率(MD/TD)	%	≤2.0	
表面粗糙度	μm	≥0.15	
光泽度	%	≤45	

2.6.2　特点

相对其他聚酯薄膜产品而言，该聚酯薄膜产品的特点主要体现在产品的表面低光泽度，即产品表面粗糙。

2.6.3　主要应用规格

目前脱膜市场常用的规格是 0.075mm×1350mm，标签和广告的规格不定。

2.7　白板聚酯薄膜

白板聚酯薄膜采用在聚酯切片中加入适量的钛白粉、适合的荧光增白剂、辅助增白剂以及其他辅助填料，根据一定配比而制成的主要用于广告耗材、印刷片基、电子白板、白色标签、薄膜开关支持体、磁带、磁卡、胶片等用途。

2.7.1　白板聚酯薄膜的性能

白板聚酯薄膜具有普通聚酯薄膜产品的物理力学性能如高拉伸强度、一定的刚性、高温尺寸稳定性和耐化学腐蚀性，同时还具有其自身的特点如白度高、雾度大、透光率低、并有适当的表面张力。其典型性能见表 1.7-18。

表 1.7-18　　白板聚酯薄膜产品典型性能

指标名称		单　位	指　标　值		
			0.075mm	0.125mm	0.188mm
厚度偏差		mm	±0.003	±0.005	±0.008
拉伸强度		MPa	180	165	145
断裂伸长率		%	100	100	100
热收缩率(150℃,30min)	纵向	%	1.2	1.2	1.2
	横向		0.8	0.8	0.8
密　度		kg/m³	1490～1500		
熔　点		℃	256～260		
透光率(P 值)		%	4～50		
白度值(L 值)		%	93	94	94

2.7.2　白板聚酯薄膜的主要特点

白板聚酯薄膜的主要特点是产品白度值大、透光率低、雾度大。

2.7.3　白板聚酯薄膜的应用

白板聚酯薄膜的应用非常广泛，如磁记录用的磁卡、磁带、电脑软磁盘等；户内、户外用的广告喷绘耗材；还有印刷片基、白色标签、薄膜开关支持体、电子白板等。

（1）用作磁记录用的磁卡、磁带、电脑软磁盘。在白板聚酯薄膜的表面涂布一层磁记录材料，经抛光、磁取向、格式化处理后就制作成磁卡、磁带或电脑软磁盘。由于普通白板聚酯薄膜表面电阻较大，生产过程中易产生静电，影响磁记录材料的规则排序，常常需经过表面抗静电涂布处理。

（2）广告喷绘耗材。广告喷绘耗材里用聚酯薄膜作基材只是其中的一类，就是聚酯薄膜的表面涂布一层对油墨浸润性、分散性、附着力好的涂料而制成。由于聚酯薄膜表面的特性对油墨选择性非常高，只有聚酯专用油墨才能印刷，而聚酯专用油墨很贵，故常常需改性处理后才能进行喷绘、印刷。

目前用于广告喷绘耗材的聚酯薄膜有两种，普通透明聚酯薄膜和白板聚酯薄膜。普通透明聚酯薄膜主要用于背喷耗材，白板聚酯薄膜主要用于正喷耗材。选择合适透光率的白板聚酯薄膜是生产优质产品的关键。

（3）电子白板。目前在教育行业采用电子白板代替传统的黑板。在白板聚酯薄膜的一面进行暗格印刷后进行表面硬化层涂布处理，方便老师在白板上写字、作图；再在另一面做电子器件处理，可以连接电脑、幻灯等作显示器用。不仅书写性、擦除性好，而且经久耐用，可保 10 年不变色、不粘色。

（4）白色标签。在白板聚酯薄膜的一面上涂布一层不干胶，在另一面印刷商标、标志等，再按需要冲切成所需形状。

2.8　电容器用聚酯薄膜

2.8.1　几种常用薄膜电容器的特点比较

（1）聚酯薄膜电容器。介电常数较高，体积小、容量大、稳定性较好，适宜做旁路电容。

（2）聚碳酸酯薄膜电容器。此电容性能比聚酯电容好，耐热与聚酯电容相同，可替代聚酯，纸介电容器，广泛应用于直流交流，脉动电路中。

（3）复合薄膜电容器。此电容选择了两种不同的薄膜（或纸与薄膜）复合做介质。例如聚苯乙烯薄膜与聚丙烯薄膜复合制作的电容器，这种电容比聚苯乙烯电容提高了抗电强度和温度，减小了体积，但是电容的温度系数和损耗稍高。

（4）聚苯乙烯薄膜电容器。主要特点是绝缘电阻高，损耗小，容量精度高，电参数随频率温度变化小，缺点是体积大，工作温度不高（上限为 70℃）该电容主要应用于滤波，高频调谐器，均衡器中。

（5）聚丙烯薄膜电容器。此电容性能和聚苯乙烯电容相似，但体积小，工作温度上限可达 85～100℃损耗为 0.01～0.001，温度系数为 -100×10^{-6}～400×10^{-6}，容量稳定性比聚苯乙烯电容稍差。可用于交流、激光耦合等电路。

（6）聚四氟乙烯薄膜电容器。此电容损耗小，耐热性好，工作温度可达 −150～200℃电参数的温度频率特性稳定，耐化学腐蚀好，缺点是耐电晕性差，成本高，主要应用于高温高绝缘，高频的场合。

（7）聚酰亚胺薄膜电容器。此电容的电性能与聚脂电容相近，而耐热性及耐寒性与聚四氟乙烯电容相近，并且耐辐射，耐燃烧，可以在恶劣环境下工作。

2.8.2　主要用途和产品特点

电容器用聚酯薄膜主要用于直流薄膜电容器，为家用电器和电子信息产品配套。

电容器用聚酯薄膜具有介电常数高，体积小、容量大、稳定性较好，厚度均匀性好等特点。耐热性好，可在 120～130℃工作。缺点是损耗较大，且随频率变化较大（见表 1.7-19），这种电容器可替代纸介电容器，一般工作在直流和脉动电路，不适于在高频下工作。

表 1.7-19　　国内 6 种规格常规产品的主要性能指标

公称厚度(μm)	拉伸强度(MPa) ≥	断裂伸长率(%) ≥	热收缩率(%) ≤	工频电气强度(MV/m) ≥	直流击穿电压(kV) ≥	体积电阻率(Ω·m) ≥	介质损耗因数 ≤
1	190	95	1.5/0.5	285	2.26	2.5×10^{15}	3.0×10^{-3}
2	190	95	1.5/0.5	285	2.65	2.5×10^{15}	3.0×10^{-3}
3	190	100	1.5/0.5	285	3.04	2.5×10^{15}	3.0×10^{-3}
4	200	100	1.5/0.5	285	3.82	5.0×10^{15}	3.0×10^{-3}
5	200	100	1.5/0.5	270	4.78	5.0×10^{15}	3.0×10^{-3}
6	200	100	1.5/0.5	260	6.94	5.0×10^{15}	3.5×10^{-3}

2.9　表面硬化聚酯薄膜

表面硬化聚酯薄膜(有时也叫耐划伤聚酯薄膜)是在表面预处理后的高透明聚酯薄膜的表面涂以增加薄膜表面硬度、提高耐划伤性能的有机涂层的一种功能聚酯薄膜。

2.9.1　主要性能

表面硬化聚酯薄膜的性能见表 1.7-20。

表 1.7-20　　表面硬化聚酯薄膜的性能

试验项目	单位	指标值		
		平均值	最大值	最小值
厚度公差	mm	+0.001	—	—
收缩率(150℃，烘 30min)	%	0.3/0.0	0.4/0.0	0.1/0.0
雾度	%	3.47	3.53	3.43
透光率	%	90.0	91.8	89.9
硬度	H	3～4	4	3
附着力	—	1 级		
耐溶剂(酒精、丙酮等)(用棉布蘸 99.5%的酒精在 500g 荷重下往复 100 次)	—	无变化		
耐洗涤剂性(在 3%的碱性洗涤液中和在 5%的中性洗洁精溶液中浸泡 24h)	—	无变化		
耐化学性(在 5%的 HCl 溶液中浸泡 30min，在 5%的 NaOH 溶液中浸泡 4h)	—	无变化		
耐热性(在沸水中蒸煮 1h)	—	无变化		
耐水性(室温下水中浸泡 7 天)	—	无变化		

注　硬度是指铅笔硬度。

2.9.2　主要用途

表面硬化聚酯薄膜主要用于各种面版和触摸开关的面膜层。面膜是将彩色油墨丝印至透明硬化膜背面，一旦丝印完成并切割成形，此层就成为彩色面膜层。面膜层为薄膜开关的组成部分，它能清楚地显示开关的功能、显示颜色、面膜类型以及开关的操作位置，它还能起保护作用。

2.9.3　几种面膜材料的性能比较

面膜材料常见的有聚氯乙烯（PVC）、聚碳酸酯（PC）、聚酯（PET），大多数都采用聚酯材料。3 种主要材料的相关特性见表 1.7-21。

表 1.7-21　　3 种主要材料的相关特性

性能特征	聚氯乙烯(PVC)	聚碳酸酯(PC)	聚酯(PET)
折曲寿命	异常	较好	优良
耐化学腐蚀能力	极好	一般	优良
耐磨损能力	较差	极好	优良(处理过的)
绝缘性能	极好	较差	优良
窗口透明度	不及 PC，呈微蓝色	极好	稍差
温度级别	较差	优良	优良
抗紫外线能力	较好	差	差

2.10　黑色聚酯薄膜

黑色聚酯薄膜，以 PET 和特种黑色母粒为原料，通过双轴拉伸平衡膜生产装置拉制而成。主要用于高档录音录像磁带盒，磁带黑滑纸，电声器材，胶带等。主要适用于磁记录材料的基膜和特殊包装膜。

2.10.1　主要性能

薄膜表面应平整光洁，不应有折皱、撕裂、颗粒、气泡、针孔和外来杂质等缺陷，薄膜边缘应整齐无破损。黑色遮盖度好。色度均匀、永久、表面光亮平滑。具有好的力学性能和热稳定性。主要性能参数见表 1.7-22。

表 1.7-22　　黑色聚酯薄膜主要性能参数

指标名称		单位	指标值
厚度		μm	25～100
拉伸强度	MD	MPa	≥180
	TD		≥180
断裂伸长率	MD	%	≥120
	TD		≥120
热收缩率(150℃，30min)	MD	%	≥1.8
	TD		≥1.2
雾度		%	4.0～98

2.10.2　特点

热收缩率低、尺寸稳定性好，拉伸强度高，同时还具有色度均匀、热稳定性好、表面光亮平滑等特点。

2.10.3　主要应用规格

市场主要应用厚度为 18～36μm 的聚酯薄膜产品。宽度范围为 330～1300mm。

3 聚酰亚胺薄膜

聚酰亚胺薄膜最先由美国杜邦公司研究开发，该公司于 1959 年申请了专利，并于 1962 年产业化。我国于 1965 年开始对其进行研究开发，1970 年由桂林电器科学研究所设计了第一条流涎法生产线，同期上海树脂研究所设计了第一条浸渍法生产线，1984 年由桂林电器科学研究所设计了第一条双轴定向法中试生产线。至此，我国有 3 种型号的聚酰亚胺薄膜，即 6050（浸渍法）、6051（流延法）、6052（双轴定向法）。3 种型号所对应的规格见表 1.7-23。

表 1.7-23　　3 种聚酰亚胺薄膜型号及规格

型　号	规　格（mm）
6050	0.025，0.050，0.075，0.10
6051	0.025，0.050，0.075，0.10
6052	0.0125，0.025，0.050，0.075，0.10，0.125

聚酰亚胺薄膜由均苯型四甲酸二酐和 4,4'— 二胺基二苯醚在极性溶剂 N,N'—二甲基乙酰胺中合成得聚酰胺酸溶液，然后将聚酰胺酸溶液在钢带或铝箔上形成均匀的液膜，烘干溶剂后进行后处理，即得聚酰亚胺薄膜，这时的分子结构中含有酰亚胺键。

3.1 物理性能

聚酰亚胺薄膜的物理性能见表 1.7-24。

表 1.7-24　　聚酰亚胺薄膜的物理性能

指标名称		单位	指标值		
			195℃	23℃	200℃
密　度		g/cm^3	—	1.42 ±0.02	—
拉伸强度 MD≥		MPa	241	172	117
屈服点 MD≥		MPa	—	69	41
伸长率 MD≥		%	2	75	90
抗张模数 MD≥		GPa	3.5	3.0	1.86
冲击强度≥		J/mm	—	23	—
弯曲疲劳≥		次	—	10 000	—
吸水性	23℃，50%相对湿度下	%	—	1.4	—
	23℃，浸在水中 24h		—	3.4	—

3.2 介电性能

聚酰亚胺薄膜的介电性能见表 1.7-25。试验方法为 IEC 60674-2：1988 GB/T 13541—1992。

表 1.7-25　　聚酰亚胺薄膜的介电性能

指标名称		指标值	试验条件
电气强度（MV/m）≥	0.025mm	200	60Hz，直径 6mm 电极，23℃
	0.050mm	180	
	0.075mm	160	

续表

指标名称		指标值	试验条件
介电常数	0.025mm	3.5±0.4	1000Hz，23℃
	0.050mm	3.6	
	0.075mm	3.7	
介质损耗因数 ≤	0.025mm	0.03	1000Hz，23℃
	0.050mm	0.03	
	0.075mm	0.03	
体积电阻率（Ω·m）≥	0.025mm	5.0×10^{14}	125V
	0.050mm	7.0×10^{14}	
	0.075mm	8.0×10^{14}	

3.3 耐化学性能

聚酰亚胺薄膜的耐化学性能见表 1.7-26。

表 1.7-26　　聚酰亚胺薄膜的耐化学性能

化学品种类	试　验　值		试验条件
	拉伸强度保持率（%）	伸长率保持率（%）	
苯	100	82	室温下，365 天
甲苯	99	91	
甲醇	100	73	
丙酮	67	62	
变压器油	100	100	150℃，180 天
冰醋酸	85	62	110℃，36 天
对—甲酚	100	77	200℃，22 天
10%氢氧化钠	分解	分解	室温下，5 天

3.4 热性能

在热空气中聚酰亚胺薄膜的延伸率从 60%降至 1%所需要的时间见表 1.7-27。在 300℃下聚酰亚胺薄膜老化情况如图 1.7-11 所示，热失重的情况如图 1.7-12 所示。

表 1.7-27　　聚酰亚胺薄膜的延伸率从 60%降至 1%所需时间

温度(℃)	在热空气中所需时间	在热氮气中所需时间
450	2h	22h
425	5h	3.5 天
400	12h	2 周
375	2 天	2 个月
350	6 天浸于液体中	1 年
300	3 个月	—
275	1 年	—
250	8 年	—

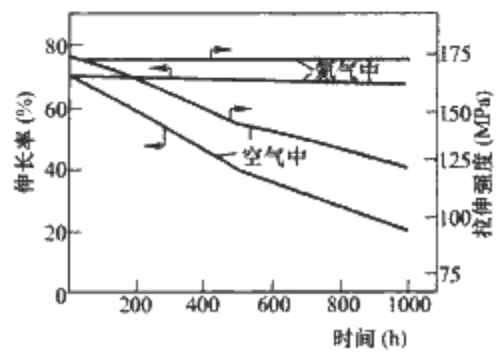


图 1.7-11　300℃下聚酰亚胺薄膜老化曲线

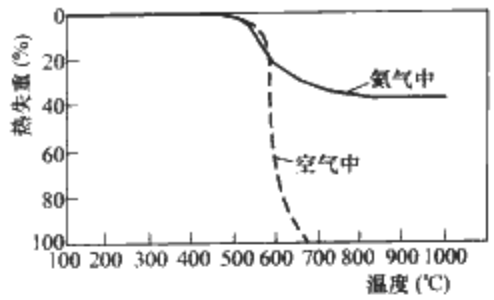


图 1.7-12　聚酰亚胺薄膜热失重的曲线

3.5　产品特点

聚酰亚胺薄膜是一种优良的绝缘材料，具有优良的耐高低温性能、优良的力学性能和绝缘性能、化学稳定性和耐湿热和耐辐照性能，聚酰亚胺薄膜分子结构中 N 元素的含量达 7%以上，燃烧时具有自熄性。

（1）优异的耐高低温性能。芳香型的聚酰亚胺薄膜具有很高的耐热性，其热分解温度在 450～600℃之间，玻璃化转变温度（T_g）一般在 380℃以上，甚至可高达 400℃ 以上，电工行业通常用作 180℃以上（甚至到达 250℃）长期使用；同时，耐低温性能也很优异，在低温环境下使用不会对其力学性能有太大影响，如在液氮中可弯曲成 1.0mm 的半径也不脆裂。

（2）优良的力学性能。由于其芳香型分子结构，聚酰亚胺薄膜的拉伸强度都在 115MPa 以上，断裂伸长率超过 40%。如 KaptonH 薄膜的拉伸强度为 170MPa，Upilex 薄膜则达到 400MPa，弹性模量为 2～4GPa。

（3）优良的电绝缘性能。聚酰亚胺薄膜的体积电阻率达到 10^{14}～$10^{15}\Omega\cdot m$，表面电阻率为 10^{13}～$10^{14}\Omega$。一般介电常数在 3.5 左右，如果在分子链上引入氟原子，进行分子结构的改进，或者涂上 F46 树脂，其介电常数可降到 2.8 左右。并在很宽的温度范围和频率范围内保持其稳定的介电性能。

（4）良好的化学稳定性及耐湿热性。聚酰亚胺薄膜一般不溶于有机溶剂，耐腐蚀、耐水解。如 Kapton 各型薄膜可经受 120℃高温水煮，对低浓度酸性介质稳定。另外，聚酰亚胺薄膜的热膨胀系数（CTE）低，一般在（10^{-5}～10^{-6}）$℃^{-1}$之间，这对于降低材料的内应力至关重要。如 Kapton V 型薄膜的 CTE 小于 $2\times10^{-5}℃^{-1}$，与金属铜的 CTE 接近。

（5）良好的耐辐射性能：聚酰亚胺薄膜在 5×10^9Rad 剂量辐射后，机械强度仍保持在 86%以上。可以用于航空器、核电站、核潜艇等场所的电机、电器和电子设备中。聚酰亚胺薄膜作为高性能绝缘材料在电机、电器及电子工业中越来越广泛的应用尤为引人注目。

3.6　适用范围和应用技术

聚酰亚胺薄膜与 Nomex 制成柔软复合材料可用作电机电器的线圈绝缘，也可涂上 F46 树脂用于电磁线的绕包绝缘，与电子铜箔复合制成覆铜箔板，制成用于摄像机中的柔性印制电路板，其基本用途如图 1.7-13、图 1.7-14、图 1.7-15 所示。除此之外近年来聚酰亚胺薄膜经过改性后用于变频电机中的绝缘，可以耐受电流的脉冲。

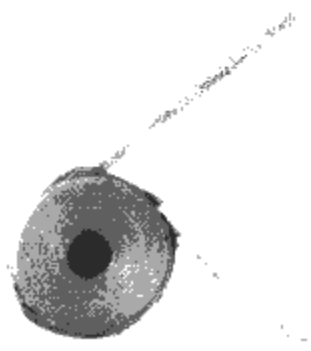


图 1.7-13　电器线圈绝缘



图 1.7-14　电机电磁线绝缘



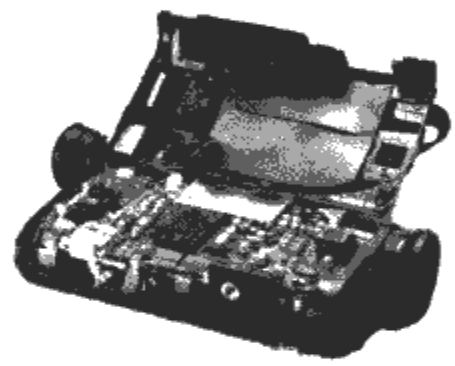


图 1.7-15　摄像机中的柔性印制电路板

4　压敏胶粘带

压敏胶粘带的耐热性按基材和粘合剂的耐热性区分，基材对电气性能起主要作用。粘合剂分为热塑性、热固性和热稳定性三种，对使用工艺起主要作用。

4.1　组成

压敏胶粘带的组成如表 1.7-28 所示。

表 1.7-28　　压敏胶粘带的组成

基　材	粘合剂	特　性
聚氯乙稀 聚乙烯 聚丙烯 聚酯薄膜 聚酰亚胺薄膜 聚芳酰胺纤维纸	热塑性	在室温下能长期保持紧固力，高温下丧失紧固力，使用作工艺辅助材料
	热固性	室温下又较高初始粘结力，高温下保持稳定，加热后可固化，适用于做线圈绝缘，并可浸漆处理
	热稳定性 预固化有机聚合物	在高温下长期保持其全部性能而粘合特性并不变化，适用于加热后容易清楚的场合

4.2 性能

聚酰亚胺薄膜有机硅压敏粘带（AI—S）、聚酰亚胺薄膜丙烯酸压敏粘带（AI—A）性能见表 1.7-29。聚芳酰胺纤维纸有机硅压敏粘带性能见表 1.7-30。聚芳酰胺纤维纸丙烯酸压敏粘带性能见表 1.7-31。

表 1.7-29 聚酰亚胺薄膜有机硅压敏粘带（AI—S）、聚酰亚胺薄膜丙烯酸压敏粘带（AI—A）性能

指标名称	单位	指标值			
		AI—S10	AI—S20	AI—A10	AI—A20
厚度	mm	0.06	0.08	0.06	0.08
厚度允许偏差	mm	±0.01			
聚酰亚胺薄膜厚度	mm	0.025	0.050	0.025	0.050
拉伸强度	MPa	≥90	≥90	≥90	≥90
断裂延伸率	%	≥40	≥40	≥40	≥40
电气强度	MV/m	≥90	≥90	≥90	≥90
粘结力(对钢板)	N/cm	≥2.0	≥2.0	≥1.6	≥1.6
粘结力(对底材)	N/cm	≥2.0	≥2.0	≥1.5	≥1.5
热处理后的黏结性		3 个试样全部通过			
温度指数	—	≥180		≥155	
阻燃性	UL—94	V—0			
外观质量		开卷时无撕裂和胶层转移现象			
供货尺寸		成卷供货，卷宽 10～500mm 按用户要求，卷长 $33^{+1.0}_{0}$m，塑料管芯 76mm($\phi 3''$)			

表 1.7-30 聚芳酰胺纤维纸有机硅压敏粘带性能

指标名称	单位	指标值		
		AN—S20	AN—S30	AN—S50
厚度	mm	0.09	0.12	0.16
厚度允许偏差	mm	±0.02		
Nomex 纸厚度	mm	0.05	0.08	0.13
拉伸力	N/cm	≥30	≥50	≥100
断裂延伸率	%	≥5.0	≥8.0	≥10.0
击穿电压	kV	≥2.0	≥2.5	≥3.5
粘结力(对钢板)	N/cm	≥2.0		
粘结力(对底材)	N/cm	≥1.0		
热处理后的粘结性	—	3 个试样全部通过		
温度指数	—	≥180		
外观质量	—	开卷时无撕裂和胶层转移现象		
供货尺寸		成卷供货，卷宽 10～457mm 按用户要求，卷长 $50^{+1.0}_{0}$m		

表 1.7-31 聚芳酰胺纤维纸丙烯酸压敏粘带性能

指标名称	单位	指标值		
		AN—A20	AN—A30	AN—A50
厚度	mm	0.09	0.12	0.16
厚度允许偏差	mm	±0.02		
Nomex 纸厚度	mm	0.05	0.08	0.13
拉伸力	N/cm	≥30	≥50	≥100
断裂延伸率	%	≥5.0	≥8.0	≥10.0
击穿电压	kV	≥2.0	≥2.5	≥3.5
粘结力(对钢板)	N/cm	≥2.0		
粘结力(对底材)	N/cm	≥1.0		
热处理后的粘结性	—	3 个试样全部通过		
温度指数	—	≥180		
外观质量	—	开卷时无撕裂和胶层转移现象		
供货尺寸		成卷供货，卷宽 10～457mm 按用户要求，卷长 $50^{+1.0}_{0}$m		

4.3 特点

聚酰亚胺薄膜粘带和聚芳酰胺纤维纸粘带是一种优良的绝缘材料，具有优良的机械强度、优良的电气性能、优良的耐热性，使用工艺简单的特点：

(1) 热稳定性优异，无残胶转移现象。采用聚酰亚胺薄膜和聚芳酰胺纤维纸作为基材，并涂上耐热的丙烯酸胶或有机硅胶粘剂，确保产品具有基材的稳定可靠的耐热性；经高温处理后无残胶转移现象。

(2) 胶层粘附力强，无树脂溢出和针孔气泡现象。

(3) 产品柔韧性好，强韧耐撕，适形性优良，能良好粘附在不同形状的工件表面。

4.4 应用范围

(1) 热塑性粘带。用于扎紧绕组端头，固定包扎带末端，绑紧引出线位置，磁极极身绝缘定位，常温下的接头包扎密封，固定垫片，插入绝缘层，接线柱包扎等。

(2) 热固性粘带。用于绕包电磁线，绕线转子接头，直流电机电枢线圈端头，电机连接线，槽绝缘槽口补强，线圈主绝缘，线圈或绕组端部包扎等。

(3) 热稳定性粘带。用于浸渍时不需要漆膜表面的遮蔽等。

(4) 聚酰亚胺薄膜压敏粘带。广泛应用于电机和变压器线圈绕包，对地绝缘、层间和相间绝缘，一般电机电器线圈端部包扎固定和其他在高温工作条件下的粘结绝缘；电子印刷线路板波峰焊和热风整平时防护覆盖以及其他需在高温和腐蚀条件下工作的粘结包覆。

(5) 聚芳酰胺纤维纸粘带。广泛应用于较高要求的电子线圈、电容器、微型马达绕线及引出线扎束等应用条件下的粘结绝缘。

5 复合材料

随着科学技术的发展，单一材料已不能满足电气和电子工业对绝缘材料提出的各种要求，因此，在 20 世纪 60 年代开始以柔软薄膜复合材料代替单一材料，可以弥补单一材料的缺陷。

复合制品又称柔软复合材料，是在薄膜（聚酯薄膜、聚酰亚胺薄膜）的一面或两面粘合电工绝缘纸板、玻璃漆布，合成纤维纸等制成，或两面为薄膜，中间是合成纤维纸、石棉纸、玻璃布，经浸渍压合制成。

复合材料具有薄膜材料和纤维材料的综合特性，明显地改善了绝缘材料的抗撕性、浸渍性和绝缘工艺性，比单一材料性能好，使用方便。

绝缘纸板和其他纤维材料的作用是增加薄膜的机械强度和挺度，保持良好的柔软性，提高耐热性。纤维纸有优良的

吸附性，与槽壁和线圈之间有良好的附着性，避免运行时产生位移。薄膜具有优良的介电性能，可弥补纤维纸的介电强度之不足，经复合的柔软材料，可以满足介电性能，力学性能和应用工艺性能要求。适用于电机、电器、变压器以及家用电器、电子设备的槽绝缘、相间绝缘，导线绝缘和衬垫绝缘。

5.1　6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料

6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料于 20 世纪 60 年代后期开始生产。该产品是由聚酯薄膜涂以粘合剂与一层绝缘纸板复合而成。

5.1.1　物理性能

6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料物理性能见表 1.7-32。

5.1.2　力学性能

6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料力学性能见表 1.7-33。

5.1.3　电气性能

6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料电气性能见表 1.7-34。

表 1.7-32　　6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料物理性能　　mm

指标名称		指标值									
产品标称厚度		0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.27	0.30	0.35	0.45	0.60
厚度允许偏差		±0.020		±0.030					±0.035	±0.045	±0.060
薄膜厚度	6520—25	0.025									
	6520—36	0.036									
	6520—50	0.050									

表 1.7-33　　6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料力学性能

指标名称			单位	指标值									
产品标称厚度			mm	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.27	0.30	0.35	0.45	0.60
拉伸强度	纵向	未弯折	N/10mm	≥100	≥110	≥120	≥135	≥150	≥175	≥200	≥240	≥360	≥440
		弯折后		≥70	≥75	≥80	≥85	≥95	≥100	≥110	≥180	≥275	≥320
	横向	未弯折		≥80	≥85	≥90	≥90	≥95	≥100	≥105	≥120	≥180	≥200
		弯折后		≥50	≥50	≥50	≥55	≥60	≥70	≥80	≥115	≥175	≥190
伸长率		纵向	%	≥2						≥3			
		横向		≥8						≥10			

表 1.7-34　　6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料电气性能

指标名称			单位	指标值									
产品标称厚度			mm	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.27	0.30	0.35	0.45	0.60
击穿电压	6520—25	未弯折	kV	≥6.0									
		弯折后		≥5.0									
	6520—36	未弯折		≥7.0									
		弯折后		≥6.0									
	6520—50	未弯折		≥8.0									
		弯折后		≥6.0									

5.1.4　粘合性能

6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料粘合性能见表 1.7-35。

表 1.7-35　　6520 聚酯薄膜绝缘纸复合材料粘合性能

指标名称	指标值
常态粘合性	不分层
热态粘合性 (130℃±20℃，10min)	不分层，不起泡，不流胶

5.1.5　产品特点

聚酯薄膜绝缘纸柔软复合材料具有良好的介电性能和极高的力学强度。与常用溶剂和绝缘浸渍漆相容性好。

5.1.6　适用范围和应用技术

适用于电机、电器、变压器以及家用电器、电子设备的槽绝缘、相间绝缘、导线绝缘和衬垫绝缘。

5.2　6630、6630A 聚酯薄膜聚酯纤维纸复合材料

6630、6630A 是在一层聚酯薄膜（M）两侧粘贴聚酯纤维非织布（D）制成的 3 层柔软复合材料（DMD）。产品按聚酯纤维非织布标称厚度分为两个型号（见表 1.7-36）。

表 1.7-36　　聚酯纤维非织布标称厚度的两个型号

产品型号	聚酯纤维非织布标称厚度	用　途
6630	0.05	按 IEC15C(中办)215 规格其材料组成均由二层 0.050mm 厚聚酯非织布与 IEC 60674—3—2 系列聚酯薄膜粘成的介电性能高的电绝缘材料，适用于机械嵌线绝缘工艺
6630A	0.05～0.10	按用户需求的较为柔软的电绝缘材料，适用于手工嵌线绝缘工艺

5.2.1　物理性能

6630、6630A 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料性能见表 1.7-37 和表 1.7-38。

5.2.2　力学性能

6630、6630A 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料力学性能见表 1.7-39 和表 1.7-40。

5.2.3　电气性能

6630、6630A 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料电气性能见表 1.7-41 和表 1.7-42。

表 1.7-37　　6630 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料性能

指标名称	单位	指 标 值								
标称厚度	mm	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
厚度允许偏差	mm	±0.020	±0.025	±0.030				±0.035	±0.040	±0.045
标称定量及允许偏差	g/m²	140±20	190±28	220±33	260±39	300±45	350±52	425±63	500±75	560±84
薄膜标称厚度	μm	50	75	100	125	150	190	250	300	350

表 1.7-38　　6630A 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料性能

指标名称	单 位	指 标 值							
标称厚度	mm	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
厚度允许偏差	mm	±0.025	±0.030	±0.030	±0.030	±0.030	±0.035	±0.040	±0.045
标称定量及允许偏差	g/m²	170±25	200±30	220±30	250±37	300±40	340±50	400±57	470±66
薄膜标称厚度	μm	50	75	75	100	125	150	190	250

表 1.7-39　　6630 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料性能

指标名称			单 位	指 标 值								
标称厚度			mm	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
拉伸力	纵向	不弯折	N/10mm	≥80	≥120	≥140	≥180	≥190	≥270	≥320	≥340	≥370
		弯折后		≥80	≥105	≥120	≥150	≥170	≥200	≥300	≥320	≥350
	横向	不弯折		≥80	≥105	≥120	≥150	≥170	≥200	≥300	≥320	≥350
		弯折后		≥70	≥90	≥100	≥120	≥130	≥150	≥200	≥220	≥250
伸长率	纵向	不弯折	%	≥15					—		—	
		弯折后		≥10					≥5		≥3	
	横向	不弯折		≥20					—		—	
		弯折后		≥10					≥5		≥2	

表 1.7-40　　6630A 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料性能

指标名称			单 位	指 标 值							
标称厚度			mm	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
拉伸力	纵向	不弯折	N/10mm	≥100	≥120	≥130	≥150	≥170	≥200	≥300	≥340
		弯折后		≥90	≥105	≥115	≥130	≥150	≥180	≥220	≥300
	横向	不弯折		≥90	≥105	≥115	≥130	≥150	≥180	≥220	≥300
		弯折后		≥70	≥95	≥100	≥120	≥130	≥160	≥200	≥220
伸长率	纵向	不弯折	%	≥10				—		—	
		弯折后		≥10				≥5		≥3	
	横向	不弯折		≥15				—		—	
		弯折后		≥15				≥5		≥2	

表 1.7-41　　6630 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料电气性能

指标名称	单位	指 标 值								
标称厚度	mm	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
击穿电压	kV	≥6	≥7	≥9	≥10	≥12	≥15	≥18	≥20	≥22

表 1.7-42　　6630A 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料电气性能

指标名称	单 位	指 标 值							
标称厚度	mm	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
击穿电压	kV	≥7	≥8	≥8	≥10	≥11	≥11	≥16	≥19

5.2.4　粘合性能

6630、6630A 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料粘合性能见表 1.7-43 和表 1.7-44。

表 1.7-43　6630 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料粘合性能

指标名称	指　标　值
常态粘结性	不分层
热态粘结性(155℃±2℃，10min)	不分层、不起泡、不流胶

表 1.7-44　6630A 聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料粘合性能

指标名称	指　标　值
常态粘结性	不分层
热态粘结性(155℃±2℃，10min)	不分层、不起泡、不流胶

5.2.5　产品特点

具有优异的电绝缘性、耐热性和机械强度以及优异的浸渍性

5.2.6　适用范围和应用技术

适用于 Y 系列电机、电器作槽绝缘、相间、匝间和衬垫绝缘，属 B 级绝缘材料。6630 较硬，适用于机械嵌线工艺；6630A 较软，适用于手工嵌线工艺。

5.3　6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维纸复合材料

6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料（F 级 DMD），是选用高耐温聚酯薄膜和特制的聚酯纤维非织布以 F 级胶粘剂粘合而成。

5.3.1　物理性能

6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料物理性能见表 1.7-45。

5.3.2　力学性能

6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料力学性能见表 1.7-46。

表 1.7-45　6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料物理性能　mm

指标名称	指　标　值							
标称厚度	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40
厚度允许偏差	±0.020	±0.025	±0.030	±0.030	±0.030	±0.035	±0.040	±0.040

表 1.7-46　6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料力学性能

指标名称			单位	指　标　值							
标称厚度			mm	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40
拉伸强度	纵向	不弯折	N/10mm	≥80	≥100	≥120	≥130	≥150	≥170	≥200	≥300
		弯折后		≥80	≥90	≥105	≥115	≥130	≥150	≥180	≥220
	横向	不弯折		≥80	≥90	≥105	≥115	≥130	≥150	≥180	≥220
		弯折后		≥70	≥80	≥95	≥100	≥120	≥130	≥160	≥200
伸长率		纵向	%	≥10					≥5		
		横向		≥15					≥5		

5.3.3　电气性能

6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料电气性能见表 1.7-47。

表 1.7-47　6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料电气性能

指标名称		单位	指　标　值							
标称厚度		mm	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40
击穿电压	常态	kV	≥7.0	≥8.0	≥9.0	≥10.0	≥11.0	≥13.0	≥15.0	≥18.0
	155℃±2℃		≥6.0	≥7.0	≥8.0	≥9.0	≥10.0	≥12.0	≥14.0	≥17.0

5.3.4　粘合性能

6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料粘合性能见表 1.7-48。

表 1.7-48　6641 改性聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料粘合性能

指标名称	指标值
热态粘合性(180℃±2℃，10min)	不分层、不起泡、不流胶
受潮后粘合性	不分层

5.3.5　产品特点

具有较好的力学、电气、耐热性能和良好的浸渍性。

5.3.6　适用范围和应用技术

适用于一般 F 级电机作槽、相绝缘和衬垫绝缘。

5.4　6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料

6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料是由聚酯薄膜（M）两面粘贴聚芳酰胺纤维纸（N）而成的 3 层（NMN）柔软复合材料。

5.4.1　物理性能

6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料物理性能见表 1.7-49。

表 1.7-49　6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料物理性能

指标名称	单位	指　标　值						
标称厚度	mm	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35
厚度允许偏差	mm	±0.02		±0.03			±0.04	
定量	g/m²	180±25	210±30	240±30	260±35	300±40	350±50	430±50

5.4.2　力学性能

6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料力学性能如表 1.7-50 所示。

表 1.7-50 6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料力学性能

指标名称			单位	指标值						
标称厚度			mm	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35
拉伸力	纵向	不弯折	N/10mm	≥150	≥160	≥180	≥200	≥220	≥270	≥320
		弯折后		≥80	≥110	≥130	≥150	≥180	≥200	≥250
	横向	不弯折		≥90	≥110	≥130	≥150	≥180	≥200	≥250
		弯折后		≥70	≥90	≥110	≥130	≥150	≥170	≥200
伸长率	纵向		%	≥10	≥12					
	横向			≥15	≥18					

5.4.3 电气性能

6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料电气性能见表 1.7-51。

表 1.7-51 6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料电气性能

指标名称		单位	指标值						
标称厚度		mm	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35
击穿电压	不弯折	kV	≥7	≥10	≥11	≥12	≥13	≥15	≥20
	弯折后		≥6	≥8	≥9	≥10	≥12	≥13	≥16

5.4.4 粘合性能

6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料粘合性能见表 1.7-52。

表 1.7-52 6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料粘合性能

指标名称	指标值
常态粘结性	不分层
热态粘结性(180℃±2℃，10min)	不分层、不起泡、不流胶

5.4.5 产品特点

这种复合材料的性能与 DMD 相似，它可以克服纤维纸强度差和聚酯薄膜耐热性能低的缺点。具有优异的耐热性、介电性能和较高的机械强度。

5.4.6 适用范围和应用技术

适用于 F 级电机槽绝缘，匝间、相间和衬垫绝缘，长期工作温度为 155℃。

5.5 6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸复合材料

6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料是由聚酰亚胺薄膜（H）两面粘以聚芳酰胺纤维纸（N）而成的高级电工绝缘材料。

5.5.1 物理性能

6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料物理性能见表 1.7-53。

表 1.7-53 6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料物理性能

指标名称	单位	指标值						
标称厚度	mm	0.15	0.17	0.20	0.23	0.25	0.30	0.33
厚度允许偏差	mm	±0.02		±0.03		±0.04		±0.05
定量	g/m²	155±25	175±25	195±30	230±35	260±40	300±45	330±50

5.5.2 力学性能

6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料力学性能见表 1.7-54。

表 1.7-54 6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料力学性能

指标名称			单位	指标值						
标称厚度			mm	0.15	0.17	0.20	0.23	0.25	0.30	0.33
拉伸力	纵向	不弯折	N/10mm	≥120	≥140	≥160	≥180	≥200	≥250	≥270
		弯折后		≥70	≥90	≥90	≥130	≥150	≥170	≥180
	横向	不弯折		≥80	≥90	≥100	≥110	≥120	≥150	≥170
		弯折后		≥50	≥70	≥80	≥80	≥100	≥110	≥130
伸长率	纵向		%	≥10						
	横向			≥8						

5.5.3 电气性能

6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料电气性能见表 1.7-55。

表 1.7-55 6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料电气性能

指标名称		单位	指标值						
标称厚度		mm	0.15	0.17	0.20	0.23	0.25	0.30	0.33
击穿电压	不弯折	kV	≥8		≥9			≥10	
	弯折后		≥7		≥8			≥9	

5.5.4 粘合性能

6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料粘合性能见表 1.7-56。

表 1.7-56 6650 聚酰亚胺薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料粘合性能

指标名称	指标值
常态粘结性	不分层
热态粘结性(200℃±2℃，10min)	不分层、不起泡、不流胶

5.5.5 产品特点

该材料综合了 Nomex 纸的热、电及化学性能与粉云母的耐电晕性能。其特点是 180℃下热稳定性好，有较高的耐电弧性和较好的力学性能。

5.5.6 适用范围和应用技术

适用于高压绝缘。主要用作 H 级电机、干式变压器等的槽、相间、匝间和衬垫绝缘。长期工作温度为 180℃。B、F 级电机、电器的特殊部位也可用它。

5.6 环氧预浸渍材料

由 DMD、NMN 及 NHN 等复合材料浸渍树脂，经烘焙而成。

5.6.1 物理性能

环氧预浸渍材料物理性能见表 1.7-57。

表 1.7-57 环氧预浸渍材料物理性能

指标名称	单位	指标值			
标称厚度	mm	0.18	0.20	0.23	0.25
厚度公差	mm	±0.030	±0.035		
可溶性树脂含量	g/m²	60±15			
挥发物含量	%	≤1.5			

5.6.2　力学性能

环氧预浸渍材料力学性能见表 1.7-58。

表 1.7-58　　环氧预浸渍材料力学性能

指标名称	单位	指标值			
标称厚度	mm	0.18	0.20	0.23	0.25
拉伸力(纵向，不弯折)	N/10mm	≥70	≥80		≥100
拉伸剪切强度	MPa	≥3.0			

5.6.3　电气性能

环氧预浸渍材料电气性能见表 1.7-59。

表 1.7-59　　环氧预浸渍材料电气性能

指标名称	单　位	指　标　值
介电强度	MV/m	≥40

5.6.4　产品特点

具有室温储存期长，固化温度低、固化时间短的特点，固化物具有优异的电气性能、粘结性能和耐热性能，耐热等级 F～H 级。

5.6.5　适应范围和应用技术

适用于干式变压器低压线圈铜（铝）箔绕包衬垫绝缘、以及 B、F 级电机、电器槽绝缘和匝间绝缘。

第 8 章 其 他 绝 缘 材 料

1 聚酯纤维非织布

聚酯纤维非织布是以聚酯纤维和热粘接聚酯纤维为原料，用热轧熔融粘接工艺制造而成的，具有较高的耐热性和优良的浸渍性。按成网方式不同，分为 7030 和 7031 两个型号，7030 为气流成网，纵横向性能无明显差异，7031 为机械梳理成网，纵向拉伸强度较横向拉伸强度高。

1.1 物理性能

7030、7031 聚酯纤维非织布物理性能见表 1.8-1 和表 1.8-2。

表 1.8-1 7030 聚酯纤维非织布物理性能

指标名称		单位	指标值					
标称厚度		mm	0.03	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15
厚度允许偏差	平均值	mm	±0.010	±0.010	±0.01	±0.015	±0.020	±0.02
	个别值		±0.020	±0.020	±0.020	±0.030	±0.040	±0.050
定量		g/m^2	18	28	40	60	78	90
定量不匀率		%	≤10					
表观密度		g/m^3	0.55±0.10	0.60±0.10				

表 1.8-2 7031 聚酯纤维非织布物理性能

指标名称		单位	指标值					
标称厚度		mm	0.03	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15
厚度允许偏差	平均值	mm	±0.010	±0.010	±0.01	±0.015	±0.020	±0.02
	个别值		±0.020	±0.020	±0.020	±0.030	±0.040	±0.050
定量		g/m^2	21	35	48	70	78	100
定量不匀率		%	≤10					
表观密度		g/m^3	0.65±0.10	0.70±0.10				

1.2 力学性能

7030、7031 聚酯纤维非织布力学性能见表 1.8-3 和表 1.8-4。

表 1.8-3 7030 聚酯纤维非织布力学性能

指标名称		单位	指标值					
标称厚度		mm	0.03	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15
拉伸强度	纵向	N/50mm	≥12	≥30	≥50	≥75	≥150	≥200
	横向		≥12	≥25	≥40	≥65	≥12	≥160
断裂伸长率	纵向	%	≥4	≥8		≥10	≥12	
	横向		≥4	≥8		≥10	≥12	

表 1.8-4 7031 聚酯纤维非织布力学性能

拉伸强度	纵向	N/50mm	≥30	≥60	≥80	≥100	≥200	≥240
	横向		≥6	≥20	≥25	≥30	≥70	≥100
断裂伸长率	纵向	%	≥6			≥8	≥10	
	横向		≥3			≥5	≥8	

1.3 热性能

7030、7031 聚酯纤维非织布热性能见表 1.8-5 和表 1.8-6。

表 1.8-5 7030 聚酯纤维非织布热性能

指标名称		单位	指标值					
标称厚度		mm	0.03	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15
热收缩率（150℃，1h）	纵向	%	≤5	≤3				
	横向		≤5	≤3				

表 1.8-6 7031 聚酯纤维非织布热性能

指标名称		单位	指标值					
标称厚度		mm	0.03	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15
热收缩率（150℃，1h）	纵向	%	≤4					
	横向		≤3					

1.4 产品特点

7030 为气流成网，纵、横向性能无明显差异，7031 为机械梳理成网，纵向拉伸强度较横向拉伸强度高。

1.5 使用范围和应用技术

广泛用于柔软复合材料的生产，也用做电缆包扎带及云母带补强材料。

2 无机绝缘材料

无机绝缘材料主要有陶瓷、玻璃和云母等，主要用于电工绝缘的陶瓷和玻璃材料的种类和主要特性见表 1.8-7。

表 1.8-7 无机绝缘材料的种类和主要特性

材料名称		材料种类	主要特性
交流绝缘子	瓷材料	硅质瓷 铝质瓷	较高的力学、电气和冷热性能 高的力学电气和冷热性能
	玻璃材料	高碱玻璃	良好的成形性能和电气、力学性能
	有机复合材料	环氧玻璃纤维棒和硅橡胶伞裙	很高的力学性能和良好的耐污特性
直流绝缘子材料		铝质瓷	很高的力学性能和绝缘电阻，优良的耐老化性能
电子、电工设备用绝缘子材料		硅质瓷	机、电性能一般
		高铝瓷	很高的机械强度，低的 $\tan\delta$，高的绝缘电阻
		滑石瓷	1MHz 下 $\tan\delta$ 小，较高的力学性能
陶瓷电容器材料		金红石瓷、钛酸钙瓷、钛酸镁瓷等	高的 ε_r，低的 $\tan\delta$，系列化的介电常数温度系数
		钛酸钡基陶瓷	很高的 ε_r，较大的 $\tan\delta$
		钛酸锶铋基陶瓷	很高的 ε_r，较低的 $\tan\delta$

续表

材料名称	材料种类	主要特性
高温绝缘陶瓷材料	高铝瓷 氮化硅瓷 锆质瓷	机械强度高，高温电阻高，耐热温度高，耐热冲击性能好
	堇青石瓷	热膨胀系数小，耐热冲击性好
高热导率陶瓷材料	氧化铝 氧化铍 氮化铝	高热导率和机械强度，优良的电气性能

2.1　绝缘子材料

2.1.1　瓷绝缘子材料的种类和性能

瓷绝缘子材料属硅酸盐陶瓷材料，具有优良的耐气候稳定性、良好的电气性能、高的耐化学腐蚀性和耐冷热急变性、高的机械强度、原料普遍、制造技术较为成熟且适宜制造各种形状结构，是目前应用最广的绝缘子材料。

用于制造电力系统高低压瓷绝缘子瓷材料主要有两类：一类是硅质瓷，其机械强度一般，仅能满足 220kV 以下的绝缘子的要求；另一类是铝质瓷，其机械强度比硅质瓷高 50%～100%，电气和耐冷热急变性也较硅质瓷好，330kV 以上及超高强度绝缘子都用铝质瓷制造。

我国瓷材料性能国家标准（GB/T 8411.1—1987《电瓷材料　第一部分：定义、分类和性能》）见表 1.8-8，表中也列出了 IEC 等相关标准。

表 1.8-8　　绝缘子用瓷材料的性能

指标名称		单位	GB/T 8411.1—1987					IEC 60672—3：1984					DIN 40685—1974			ГОСТ 20419—1983				
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	111	110	112	120	130	111	110.1	110.2	111	110.1	112	120	130
			压制硅质瓷	硅质瓷	较高强度硅质瓷	铝质瓷	高强度铝质瓷	压制硅质瓷	硅质瓷	方石英瓷	一般强度铝质瓷	高强度铝质瓷	压制硅质瓷	硅质瓷	铝质瓷	压制硅质瓷	硅质瓷	高强度硅质瓷	铝质瓷	高强度铝质瓷
开口孔隙率≤		%	3.0	0				3	0				—	0		1.5	0			
体积密度≥		g/cm³	2.2	2.3		2.4	2.5	2.2	2.2	2.3		2.5	2.2		2.3	2.2	2.3		2.4	2.5
孔隙性（180MPa·h）			—	无渗透				—	—	—	—	—	—	无渗透		—	无渗透			
弯曲强度≥	无釉	N/mm²	40	60	80	120	140	40	50	80	90	140	30	40	80	30	60	80	110	140
	上釉		—	70	100	140	160	—	60	100	110	160	—	60	100	—	70	100	140	160
拉伸强度≥	无釉	N/mm²	—	30	35	40	50	—	—	—	—	—	—	25	45	—	30	45	55	60
	上釉		—	25	40	50	60	—	—	—	—	—	—	30	60	—	35	55	65	70
冲击强度≥		kJ/m²	1.3	1.8		2.1	2.4	—	—	—	—	—	—	1.8	2.2	1.3	1.8	2.2		2.5
弹性模量≥		GPa	—	60	70	80	100	—	60	70	—	100	—	50	100	—	60	70	80	100
平均线膨胀系数	20～100℃	$10^{6}K^{-1}$	3～5					3～5	3～6	6～8	3～6	4～7	3.4～4.5	3.5～5.5	5～6	3～6	3～6	3～8	3～6.6	5～7
	20～300℃		3～6			4～7		3～6	3～6	6～8	3～6	4～7	—	—	—	3～6	—	—	—	—
	20～600℃		4～7	5～7		4～7		4～7	6～8	4～7	5～7	4～5	4～6	6～8	4～7	4～7	3～8	5～7.5	5.8	—
比热容（20～100℃）		J/(kg·K)	800～1000	750～1000	800～1000	750～1050	800～1050	800～900	750～900	800～900	750～900	800～900	790～880			800～900				
热导率（20～100℃）		W/(m·K)	1.0～2.5	1.0～2.5	1.4～2.5	1.5～4.0	1.5～4.0	1.0～2.5	1.0～2.5	1.4～2.5	1.2～2.6	1.5～4.0	1.2～1.6	1.2～2.6		1.0～2.5	1.0～2.5	1.4～2.5	1.2～2.6	1.5～3.0
冷热急变性≥		K	150		160			150					—	150～170		—	160	150		160
电气强度（50Hz，20℃±5℃）≥		MV/m	—	20				—	20				—	—	—	—	30	20		30
耐受电压(50Hz，试验电压时间1min)≥		kV	—	30				—	30				—	30		—	—	—	—	—
相对介电常数（50Hz，20℃±5℃）		—	—	6～7		6～8		—	6～7	5～6	6～7	6～7.5	—	6		—	6～7	5～7	5～7	6～7
介电常数的温度系数(50Hz，−60℃～+100℃)		$10^{-6}K^{-1}$	—	+600～+500				—	+600～+500				—	+600～+550		—	—	—	—	—

续表

指标名称		单位	GB/T 8411.1—1987					IEC 60672—3：1984					DIN 40685—1974			ГОСТ 20419—1983				
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	111	110	112	120	130	111	110.1	110.2	111	110.1	112	120	130
			压制硅质瓷	硅质瓷	较高强度硅质瓷	铝质瓷	高强度铝质瓷	压制硅质瓷	硅质瓷	方石英瓷	一般强度铝质瓷	高强度铝质瓷	压制硅质瓷	硅质瓷	铝质瓷	压制硅质瓷	硅质瓷	高强度硅质瓷	铝质瓷	高强度铝质瓷
介质损耗因数≤	50Hz，20℃±5℃	10^{-3}	—	25			30	—	25			30	—	25		—	25			
	50Hz，60℃		—	40				—	—	—	—	—	—	40		—	—	—	—	—
	50Hz，80℃		—	60				—	—	—	—	—	—	60		—	—	—	—	—
	50Hz，100℃		—	120				—	—	—	—	—	—	120		—	—	—	—	—
	1MHz，20℃±5℃		—	12			15	—	12			15	—	12		—	—	—	—	—
体积电阻率≥	20℃±5℃	Ω·cm	10^{12}	10^{13}				10^{13}					10^{11}	10^{11}		10^{11}	10^{13}			
	200℃		10^{8}	10^{8}				10^{8}					10^{7}	10^{7}		10^{7}	10^{8}			
	350℃		10^{6}	10^{6}				10^{6}					—	—		—	—	—	—	—
	600℃		10^{4}	10^{4}				10^{4}					10^{4}	10^{4}		10^{4}	10^{4}			
表面电阻率≥		Ω	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10^{10}			10^{10}				

2.1.2 瓷绝缘子材料的组成

瓷绝缘子材料的配方组成见表 1.8-9，化学组成见表 1.8-10，相组成见表 1.8-11。

表 1.8-9 几种瓷料的配方组成

材料名称	配方组成(质量分数)(%)			
	黏土	长石	石英	煅烧铝矾土
典型的硅质瓷	50	25	25	—
较高强度的硅质瓷	45～55	≈20	15～20	3～10
铝质瓷	45～55	≈20	≤10	20～25
高强度铝质瓷	45～55	≈20	—	30～45

表 1.8-10 瓷材料的化学组成

材料名称	化学成分(质量分数)(%)					
	SiO_2	Al_2O_3	$Fe_2O_3+TiO_2$	$CaO+MgO$	K_2O	Na_2O
硅质瓷	68.0～72.0	20.0～24.0	<1.0	<1.0	3.0～4.0	0.5～1.0
较高强度的硅质瓷	65.0～69.0	24.0～27.0	<1.5	<1.0	3.2～3.5	0.3～0.8
铝质瓷	40.0～50.0	35.0～45.0	≤2.0	<1.0	3.0～3.5	0.3～0.8
高强度铝质瓷	30.0～35.0	50.0～55.0	≤2.5	<1.0	3.0～3.5	0.3～0.8

表 1.8-11 瓷材料物相组成及作用

相组成					形态与分布	主要作用
指标名称		含量(质量分数)(%)				
		较高强度硅质瓷	铝质瓷	高强度铝质瓷		
结晶相	石英	10～15	5～10	5～10	颗粒形状不一，分布较均匀	起骨架作用，赋予瓷机械强度
	莫来石	10～15	15～20	10～15	呈鳞片状、针状或针架叠成网状，分布较均匀	赋予瓷良好的热性能和力学性能
	刚玉	3～8	15～20	30～40	呈单个自形晶或聚集团粒状，分布较均匀	显著提高机械强度，改善热性能和耐弧性能

续表

相组成				形态与分布	主要作用
指标名称	含量(质量分数)(%)				
	较高强度硅质瓷	铝质瓷	高强度铝质瓷		
玻璃相	55～5	50～60	45～55	填充于各结晶之间的空隙中	使瓷坯烧结致密，赋予良好的电气性能
闭口气孔	5～8	4～6	4～6	圆形或非圆形，分布不均匀	降低瓷的机械强度和电气性能

2.1.3 直流绝缘子的特点与组成

直流绝缘子与交流绝缘子相比具有如下一些特点：

(1) 直流绝缘子由于存在静电场的吸尘作用，污秽较为严重。直流下的污区盐密度比交流下高一级。在相同盐密度下，直流污秽闪络电压比交流污秽闪络电压有效值低约 10%～15%。

(2) 直流绝缘子的金属附件容易受腐蚀。

(3) 直流绝缘子劣化率较交流绝缘子高。

因此对直流绝缘子材料有较高的要求，需要减少瓷料中碱金属离子含量，因为碱金属含量越高，绝缘电阻越低，介质损耗越高。需要利用中和效应，提高 K^+/Na^+ 浓度比，图 1.8-1 所示为不同 K_2O/Na_2O 的介质损耗因数和温度的关系，1～5 号配方的 K_2O/Na_2O 依次为 6.28、4.49、1.80、

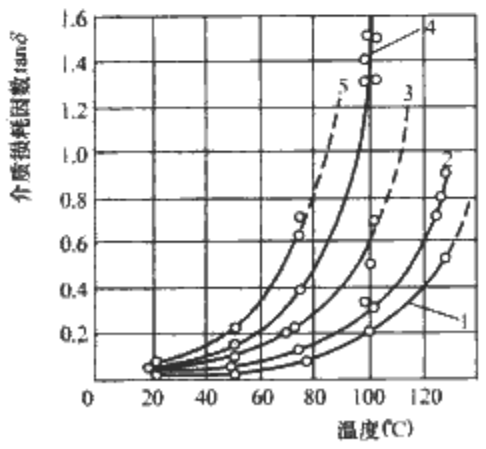


图 1.8-1 不同 K_2O/Na_2O 的介质损耗因数与温度的关系

1.22、0.44，K_2O/Na_2O 越大，介质损耗因数越低。为进一步提高直流绝缘子电阻率、降低 $\tan\delta$ 在配方中还加入 $BaCO_3$ 以抑制碱金属离子对电性能的危害，即利用加入碱土金属离子产生压抑效应。直流绝缘子采用黏土、长石、工业氧化铝等辅助熔剂组成的高强度铝质瓷配方。其配方组成范围是：黏土 45%～55%，长石 10%～20%，工业氧化铝 30%～40%，辅助熔剂和改性材料如 $BaCO_3$，3%～10%。相应的化学成分（质量分数）中的 K_2O、Na_2O 总量≥5.0%，BaO≥3%。上述组成瓷材料的体积电阻在 20±5℃时达 $10^{14}\Omega\cdot cm$ 以上，能满足直流悬式绝缘子 100℃时绝缘电阻达 $10^{10}\Omega$ 的规定。

2.1.4　绝缘子的种类、用途和性能

绝缘子广泛应用于架空输电线路、照明线路和架空通信线路的导线、变电站的母线和各种电气设备带电体的支持和绝缘。高压绝缘子的种类和结构见表 1.8-12。

2.1.4.1　高压线路针式绝缘子

用于三相电力系统标称电压 35kV 以下架空电力线路中导线的支撑和绝缘，其性能见表 1.8-13。

2.1.4.2　瓷横担绝缘子

用于 10～110kV 高压架空输电线路的导线的支持和绝缘，其性能见表 1.8-14。

2.1.4.3　高压线路柱式绝缘子

用于高压架空输配电线路中支持导线和对地绝缘。柱式绝缘子是实心不击穿型结构，具有电气性能好，机械强度高，安装维修方便的特点，特别适合污秽地区使用。其性能见表 1.8-15。

表 1.8-12　　**绝缘子的种类和结构**

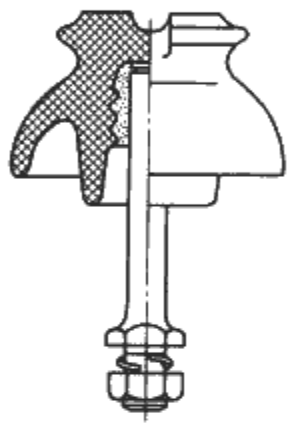
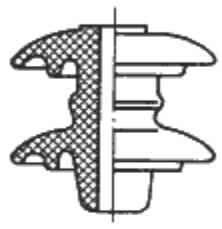
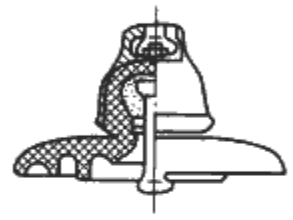
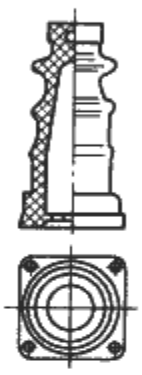
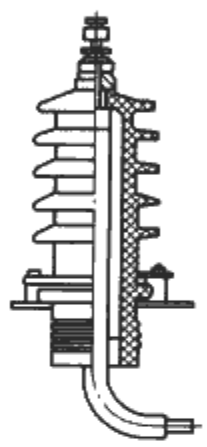
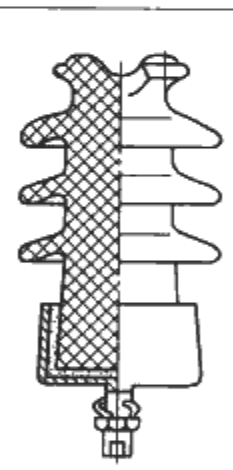
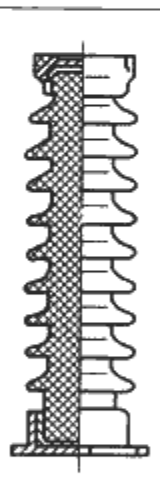
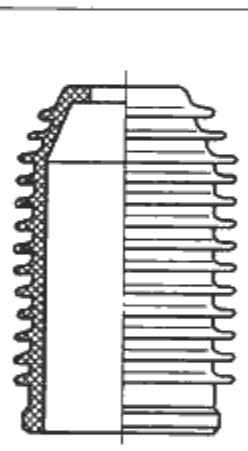
线路绝缘子			电站、电器绝缘子	
针　式	蝶　式	盘形悬式	空心支柱	套　管
				
瓷横担	棒形悬式	柱　式	棒形支柱	容器瓷套
				

表 1.8-13　　**高压针式绝缘子的性能**

（GB/T 1000.2—1988）

型　号	标准雷电冲击全波耐受电压（峰值）（kV）≥	工频湿耐受电压（有效值）（kV）≥	工频击穿电压（有效值）（kV）≥	抗弯耐受负荷（kN）≥	瓷件抗弯破坏负荷（kN）≥	最小公称爬电距离（mm）	瓷件尺寸（mm）	
							高度	直径
P—10T	75	28	95	1.4	13.7	195	105	145
PQ1—10T16	90	40	130	2.0	10.6	255	133	140
PQ1—10T20								
PQ1—10L				—				
PQ1—10LT				4.0				

续表

型　号	标准雷电冲击全波耐受电压（峰值）（kV）≥	工频湿耐受电压（有效值）（kV）≥	工频击穿电压（有效值）（kV）≥	抗弯耐受负荷（kN）≥	瓷件抗弯破坏负荷（kN）≥	最小公称爬电距离（mm）	瓷件尺寸（mm）	
							高度	直径
PQ2—10T	110	50	145	3.0	13.3	450	165	228
PQ2—10L				—				
PQ2—10LT				3.5				
PQ2—10BT				3.0				
PQ2—10BL				—				
PQ2—10BLT				3.5				

注　型号中的 P—普通型针式绝缘子；PQ1—加强绝缘 1 型（中污型）；PQ2—加强绝缘 2 型（特重污型）；B—瓷件侧槽以上部位，除承烧面外，全部上半导体釉；T—带脚，铁担；L—不带脚，瓷件与脚螺纹连接；LT—带脚，瓷件与脚螺纹连接；破折号后的数字表示额定电压 10kV；T 后的数字 16、20 表示下端螺纹直径。

表 1.8-14 瓷横担绝缘子的性能

型 号	额定电压(kV)	全波冲击耐受电压(kV)	工频湿耐受电压(kV)	最小爬电距离(公称)(mm)	抗弯破坏负荷(kN)	安装孔与稳定孔距(mm)	主要尺寸(mm)		
							绝缘距离	安装孔径	线槽宽度
S—10/2.5	10	165	45	320	2.5	40	315	18	22
S1—10/2.5	10	185	50	380	2.5	40	365	18	22
S—10/5	10	165	50	360	5.0	40	320	18	22
S—35/5	35	250	85	700	5.0	40	490	22	28
S2—35/5	35	265	100	1120	5.0	40	520	22	28

表 1.8-15 高压线路柱式绝缘子的性能

型 号	额定电压(kV)	最小公称爬距(mm)	工频湿闪电压(kV)	雷电冲击全波耐受电压(kV)	抗弯破坏负荷(kN)	主要尺寸(mm)		
						绝缘距离	直径	安装孔
PS—15/3.0	15	300	45	105	3	155	120	M16
PS—15/5.0	15	360	45	105	3	180	125	M16

2.1.4.4 高压线路蝶式绝缘子

用于架空输电线路终端，耐张和转角杆上绝缘和固定导线。其性能见表 1.8-16。

2.1.4.5 高压线路盘型悬式绝缘子

供高压架空输电线路导线和绝缘用。一般组成绝缘子串，使用于不同电压等级的电力线路。盘型悬式绝缘子是最重要和使用数量最多的绝缘子，他分普通型和耐污型两类，其结构如图 1.8-2 所示，性能见表 1.8-17 和表 1.8-18。

表 1.8-16 高压线路蝶式绝缘子的性能

(GB 1390—1993)

型号	额定电压(kV)	工频电压(kV)			机械破坏负荷(kN)	主要尺寸(mm)		
		干闪	湿闪	击穿		直径	高度	内孔径
E1	1	45	27	78	20	150	180	26
E2	1	38	23	65	20	130	150	26

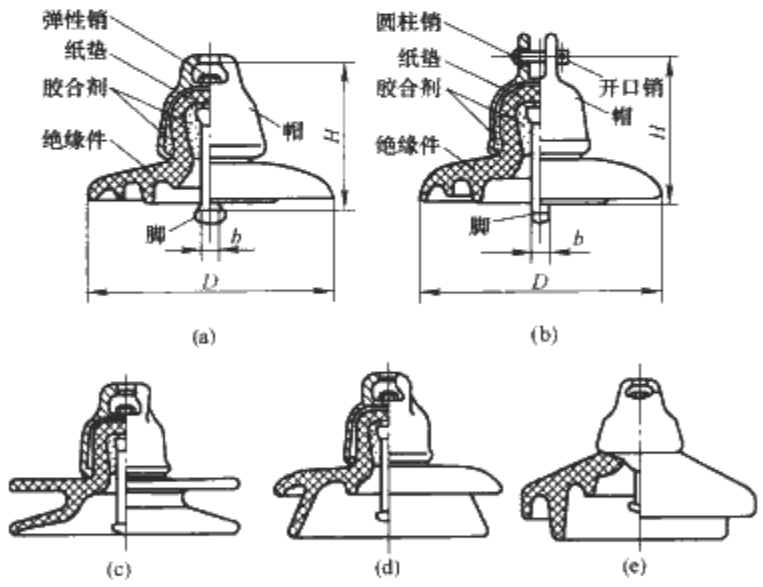


图 1.8-2 盘形悬式绝缘子的结构

(a)、(b) 普通型；(c)、(d)、(e) 耐污型

表 1.8-17 盘型悬式绝缘子的性能

(GB/T 7253—2005、ZBK50008—1990)

型号	机电破坏负荷(kN)	打击破坏负荷(N·cm)	主要尺寸(mm)			连接形式标记	雷电冲击全波耐受电压(kN)	工频电压(kV)	
			高度	伞径	最小公称爬距			湿耐受	击穿
XP—70	70	565	146	255	295	16	100	40	110
LXP1—70	70	565	146	255	295	16	100	40	110

续表

型号	机电破坏负荷(kN)	打击破坏负荷(N·cm)	主要尺寸(mm)			连接形式标记	雷电冲击全波耐受电压(kN)	工频电压(kV)	
			高度	伞径	最小公称爬距			湿耐受	击穿
XP—100	100	678	146	255	295	16	100	40	110
LXP—100	100	678	146	255	295	16	100	40	110
XP—120	120	678	146	255	295	16	100	40	110
LXP—120	120	678	146	255	295	16	100	40	110
XP2—160	160	1017	146	280	330	20	105	42	110
LXP2—160	160	1017	146	280	330	20	105	42	110
XP1—210	210	1017	170	280	335	20	105	42	120
LXP1—210	210	1017	170	280	335	20	105	42	120
XP—300	300	1017	195	320	370	24	110	45	120
LXP—300	300	1017	195	320	370	24	110	45	120

注 型号中的 X—悬式瓷绝缘子；LX—悬式玻璃绝缘子

表 1.8-18 耐污盘型悬式绝缘子

(ZBK50008—1990)

型号	机电破坏负荷(kN)	打击破坏负荷(kN)	主要尺寸(mm)			连接形式标记	50%全波冲击闪络电压(kN)	工频电压(kV)	
			高度	伞径	最小公称爬距			湿耐受	击穿
XWP1—60	60	560	160	255	400	16	120	45	120
XWP1—70	70	560	160	255	400	16	120	45	120
XWP3—70	70	560	160	280	450	16	120	45	120
XWP2—100	100	680	160	280	450	16	120	45	120
XWP6—160	160	1000	160	280	400	20	130	50	120
XHP1—60	60	560	160	255	400	16	120	45	120
XHP1—70	70	560	160	255	400	16	120	45	120
XHP1—100	100	680	160	270	400	16	120	45	120
XHP1—160	160	1000	160	280	400	20	130	50	120
XAP1—160	160	1000	160	300	400	20	130	50	120

注 XWP—双层伞耐污盘型悬式绝缘子；XHP—钟罩伞(伞裙有垂直面部分，棱的垂直高度大于 30mm)耐污盘型悬式绝缘子；XAP—大伞径耐污盘型悬式绝缘子。

2.1.4.6 高压支柱绝缘子

用于电站，变电所配电装置和高压电气设备中的高压导体部分的绝缘和支持。按使用场所分，可分为户内支柱和户外支柱绝缘子。户内支柱绝缘子的结构如图 1.8-3 所示，性能见表 1.8-19。户外支柱绝缘子的结构如图 1.8-4 所示，性能见表 1.8-20 和表 1.8-21。

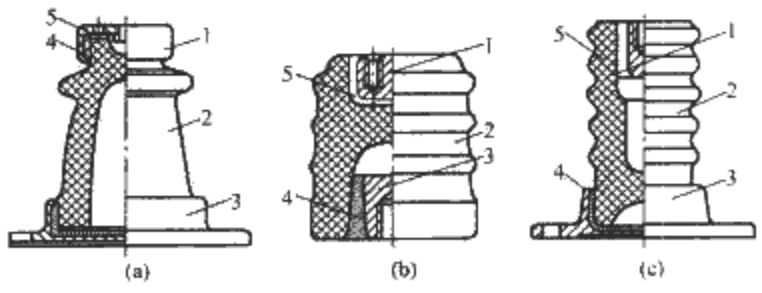


图 1.8-3 户内支柱绝缘子的种类与结构

(a) 外胶装；(b) 内胶装；(c) 联合胶装

1—上附件；2—瓷件；3—下附件；4—胶合剂；5—纸垫

表 1.8-19　　户内支柱绝缘子（GB/T 8287.2—1999）

型　号	额定电压（kV）	抗弯破坏负荷（kV）	产品高度（mm）	瓷件最大外径（mm）	上附件安装孔尺寸(mm)			下附件安装孔尺寸(mm)	
					中心孔	旁　孔		孔数/孔径	孔中心圆直径
						孔数/孔径	中心距		
ZA—6Y	6	3.75	165	86	M10	2/M6	36	1/M12	—
ZB—6Y	6	7.5	185	106	M16	2/M10	46	1/M16	—
ZA—6T	6	3.75	165	86	M10	2/M6	36	2/M12	135
ZB—6T	6	7.5	185	106	M16	2/M10	46	2/15	175
ZA—10Y	10	3.75	190	86	M10	2/M6	36	1/M12	—
ZB—10Y	10	7.5	215	106	M16	2/M10	46	1/M16	—
ZA—10T	10	3.75	190	86	M10	2/M6	36	2/12	135
ZB—10T	10	7.5	215	106	M16	2/M10	46	2/15	175
ZD—10F	10	20.0	235	150	M16	4/M12	76	4/15	155
ZD—20F	20	20.0	315	170	M18	4/M12	76	4/18	175
ZN—6/4	6	4.0	100	78	—	2/M8	18	1/M12	—
ZN—10/4	10	4.0	120	82	—	2/M8	18	1/M12	—
ZN—10/8	10	8.0	120	100	—	2/M10	24	1/M16	—
ZN—10/16	10	16.0	170	152	—	2/M12	36	1/M20	—
ZN—20/16	20	16.0	230	152	—	2/M12	36	1/M20	—
ZN—20/30	20	30.0	230	185	—	2/M12	46	2/M20	46
ZL—10/4	10	4.0	160	78	M10	—	—	2/12	130
ZL—10/8	10	8.0	170	90	M16	—	—	2/14	145
ZL—10/16	10	16.0	185	110	M16	—	—	4/14	180
ZL—20/16	20	16.0	265	125	M16	—	—	4/14	210
ZL—20/30	20	30.0	290	160	M20	—	—	4/18	250
ZL—35/4Y	35	4.0	380	105	M10	2/M8	36	1/M16	—
ZL—35/4	35	4.0	380	105	M10	2/M8	36	2/14	145
ZL—35/8	35	8.0	400	120	M16	2/M10	46	4/14	180

注　型号中的 Z—户内外胶装支柱瓷绝缘子；ZN—户内内胶装支柱瓷绝缘子；ZL—户内联合胶装支柱瓷绝缘子；Y、T、F—连接形式代号，分别表示圆形底座、椭圆形底座和方形底座。

表 1.8-20　　户外棒形支柱绝缘子（GB/T 8287.2—1999）

型　号	额定电压（kV）	抗弯破坏负荷（kV）	扭转负荷（kN·m）	主要尺寸(mm)		公称爬距（mm）	上附件尺寸（mm）		下附件尺寸（mm）		雷电冲击耐受电压（kV）	工频湿耐受电压（kV）
				产品高度	最大伞径		孔数/孔径	中心距	孔数/孔径	中心距		
ZS—10/4	10	4	—	210	125	200	2/M8	36	2/12	130	75	30
ZS—20/8	20	8	—	350	165	400	2/M12	76	4/18	210	150	50
ZS—20/16	20	16	—	350	190	400	2/M12	140	4/18	210	150	50
ZS—20/30	20	30	—	400	205	400	4/M12	140	4/18	250	150	50
ZS—35/4	35	4	1.0	400	150	625	4/14	140	4/14	140	185	80
ZSX—35/4	35	4	1.0	400	150	625	4/14	140	4/14	140	185	80
ZS—35/8	35	8	1.0	420	170	625	4/M12	140	4/14	180	185	80
ZS—63/4	63	4	2.0	760	170	1100	4/M12	140	4/14	180	325	140
ZSX—63/4	63	4	2.0	760	170	1100	4/14	180	4/M12	140	325	140
ZS—110/4	110	4	2.0	1060	190	1900	4/M12	140	4/18	225	450	185
ZSX—110/4	110	4	2.0	1060	205	1900	4/18	225	4/M12	140	450	185
ZS—110/4L	110	4.0	2.0	1080	205	1900	4/M12	140	4/M12	140	450	185
ZS—110/8	110	8.0	2.0	1060	205	1900	4/M12	140	4/18	225	450	185
ZS—220/4	220	4.0	2.0	2120	230	3800	4/M12	140	4/18	250	950	395
ZS—220/6	220	6.0	2.0	2400	290	3800	8/18	280	8/18	280	1050	460
ZS—220/8	220	8.0	2.0	2400	290	3800	8/18	280	8/18	280	1050	460
ZS—330/4	330	4.0	2.0	3200	240	5630	4/14	190	8/18	250	1245	630
ZS—500/5	500	5.0	2.0	4200	240	8800	4/18	225	8/18	300	1675	—
ZS—500/8K	500	8.0	10.0	4400	290	8800	8/18	275	8/18	300	1950	800
ZS_1—500/11K	500	11.0	10.0	4400	290	8800	8/18	275	8/18	325	1950	800
ZS_1—500/14	500	14.0	10.0	4400	305	8800	8/M16	127	8/18	325	1950	800
ZC_1—500/4K	500	—	4.0	4400	200	8800	4/18	210	4/18	210	1950	800

注　ZS—实心棒形支柱瓷绝缘子；ZSX—悬挂式实心棒形支柱瓷绝缘子；ZC—实心棒形操作支柱瓷绝缘子。

表 1.8-21　　耐污型户外棒形支柱绝缘子（GB/T 8287.2—1999）

型　号	额定电压（kV）	抗弯破坏负荷（kV）	扭转负荷（kN·m）	主要尺寸(mm)		公称爬距（mm）	上附件尺寸（mm）		下附件尺寸（mm）		雷电冲击耐受电压（kV）	工频湿耐受电压（kV）
				产品高度	最大伞径		孔数/孔径	中心距	孔数/孔径	中心距		
ZSW9—35/4—4	35	4.0	1.8	560	235	1260	4/M16	127	4/14	180	250	95
ZSW—110/10K—3	110	10	4.0	1150	260	3150	4/18	225	8/18	254	450	185
ZSW—110/4—4	110	4.0	2.0	1400	255	3906	4/M12	140	4/18	225	650	275
ZSW_1—110/8K—3	110	8.0	4.0	1220	270	3780	4/18	225	8/18	254	550	230
ZSW_4—220/4K	220	4.0	2.0	2300	245	5500	4/14	190	4/18	250	1050	460
ZSW_1—220/8K—2	220	8.0	2.0	2300	280	5500	4/18	225	8/18	250	1050	460
ZSW_1—220/15K—2	220	15	6.0	2300	290	5500	4/18	250	8/18	310	1050	460
ZSW—220/10K—3	220	10	4.0	2300	285	6300	4/18	225	8/18	254	1050	460
ZSW—220/8K—4	220	8	4.0	2650	285	7812	4/18	225	8/18	254	1175	510
ZSW—220/16K—3	220	16	6.0	2300	310	6300	8/18	254	8/18	300	1050	460
ZSW—220/8K—2	330	4.0	2.0	3400	280	8000	4/14	190	8/18	250	1425	630
ZSW—220/8K—2	330	8.0	10.0	3500	315	9075	4/18	225	8/18	275	1550	680
ZSW—220/8K—2	330	10	6.0	3465	310	9075	4/18	225	8/18	300	1550	680
ZSW_1—500/8—3	500	8.0	10.0	4700	335	13 750	4/M18	225	8/18	300	1950	800
ZSW_1—500/11K—3	500	11	10.0	4400	320	13 750	8/18	275	8/18	325	1950	800
ZSW_1—500/14—3	500	14	10	4400	335	13 750	4/M16	127	8/18	325	1950	800

注　ZSW—耐污实心棒形支柱绝缘子；K—附件安装连接结构形式，其代表上、下附件安装孔均为光孔。型号中第二个半字线后数字为耐污等级：1、2、3、4 分别对应污秽等级Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ。

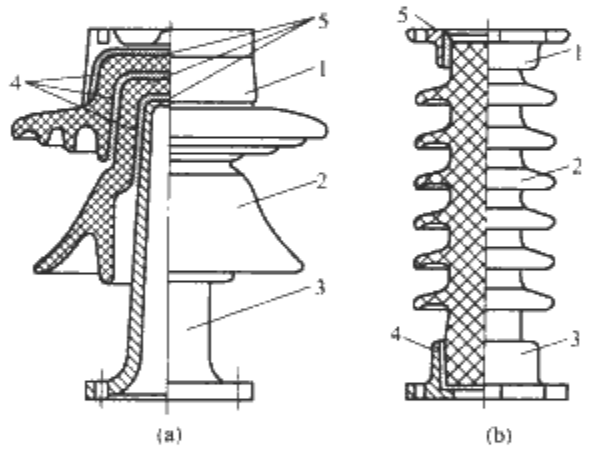


图 1.8-4　户外支柱绝缘子的结构

（a）针式支柱绝缘子；（b）棒型支柱绝缘子

1—上附件；2—瓷件；3—下附件；4—胶合剂；5—纸垫

2.2　高压电器瓷套

高压电器瓷套是一种一般不带附件或仅有安装法兰的有伞棱的空心瓷件。高压电器瓷套的种类和用途见表 1.8-22。

表 1.8-22　　高压电器瓷套的种类

种　类	用　途	举　例
套管用瓷套	作高压套管的主绝缘或部分绝缘	变压器、油断路器、电缆、电容器出线套
支柱瓷套	起主绝缘或部分绝缘作用的空心绝缘支持物	少油断路器和气体断路器的支柱瓷套和灭弧室瓷套
容器瓷套	油浸绝缘结构的绝缘容器	电流互感器、电压互感器和耦合电容器的瓷套

2.2.1　变压器瓷套

变压器瓷套的主要规格见表 1.8-23。

表 1.8-23　　变压器瓷套规格

型　号	额定电压（kV）	额定电流（A）	爬电距离（mm）	主要尺寸（mm）			备　注
				总高	外径	孔径	
B—10/630	10	630	230	300	115	35	B—变压器瓷套 L—穿缆式
B—10/3150	10	3150	230	320	150	60	
B—10/4000	10	4000	270	320	180	80	
B—20/630	20	630	340	340	115	35	
B—20/3150	20	3150	340	360	160	60	
B—20/4000	20	4000	340	360	180	80	
B—35/3150	35	3150	650	520	210	52	
B—10/315	10	315	230	240	115	14	
B—20/315	20	315	340	300	115	14	
B—35/630	35	630	680	520	210	24	

2.2.2　断路器瓷套

少油断路器瓷套的主要规格见表 1.8-24，摘自 JB/T 1542—1999《110 及 200kV 户外少油断路器用瓷套》。

表 1.8-24　　少油断路器瓷套规格

型号	额定电压（kV）	爬电距离（mm）	主要尺寸(mm)			备　注
			总高	外径	内径	
DWS—3510	35	500	310	190		DWS—户外少油断路器瓷套 DSQ—耐污型户外少油断路器瓷套
DWS—6003	60	1250	735	290	232	
DWS—11010	110	2140	1200	335	185	
DWS—11011	110	1200	700	350	220	
DWS—11014	110	2550	1400	335	185	
DWS—11001	110	3150	1590	325	185	
DWS—330—1	330 元件	3150	1570	398	216	
DWS—33001	330	6300	3140	398	216	

2.2.3　SF_6 断路器瓷套

SF_6 断路器瓷套的主要规格见表 1.8-25。

表 1.8-25　　SF_6 断路器瓷套规格

型　号	额定电压(kV)	爬电距离(mm)	主要尺寸(mm)			抗弯破坏负荷(kN·m)	液压破坏负荷(MPa)
			总高	外径	内径		
DLZ1300—04	220	2590	1300	336	180	80	3.62
$DLZW_1$1300—04	220	3480	1300	436	180	80	3.62
DLM—1380—01	220	2850	1380	432	276	35	3.62
$DLMW_1$—1380—01	220	4050	1380	498	276	35	3.62
DLJ—1550—01	220	3190	1550	336	180	35	3.62
$DLJW_1$—1550—01	220	4500	1550	402	180	35	3.62
DLZ_2—2000	220	6000	2000	478	260	45	4.4
56—0—20	220	2750	1340	470	260	34.3	4.4

注　DLZ—六氟化硫断路器用支柱瓷套；DLM—六氟化硫断路器用灭弧室瓷套；DLJ—六氟化硫断路器用电阻瓷套；W—耐污型产品。

2.2.4　电流互感器瓷套

电流互感器瓷套规格见表 1.8-26。

表 1.8-26　　电流互感器瓷套的规格

型　号	额定电压(kV)	爬电距离(mm)	主要尺寸(mm)			备　注
			总高	外径	内径	
HLW—1001	10	—	400	435	305	HLW—户外型　HWLW—户外耐污型　HWLQ—加强型
HLW—3502	35	860	530	430	290	
HWLW—3502	35	995	540	470	310	
HLW—6003	60	1150	915	600	420	
HLW—11001	110	1980	1260	630	420	
HWLW—11001	110	2750	1150	480	300	
HWLQ—11001	110	2960	1525	540	370	
HLW—22008	220	3740	2000	660	470	
HLW—33001	330	6460	2600	570	360	
HLW—50001	500	10 400	4300	845	625	

2.2.5　电压互感器瓷套

电压互感器瓷套的规格见表 1.8-27。

表 1.8-27　　电压互感器瓷套的规格

型　号	额定电压(kV)	爬电距离(mm)	主要尺寸(mm)			备　注
			总高	外径	内径	
HYW—6002	60	1150	810	525	375	HYW—户外型　HRY—电容式　HRYQ—加强型电容式
HYW—11003	110	2200	1310	630	460	
HYW—22002	220	3740	2200	660	470	
HYW—33001	330	5610	2700	680	470	
HRY—500—1	500 元件	3225	1800	610	420	
HRY—500001	500	9675	5400	610	420	
HRY—500—1	500 元件	4210	1800	610	420	
HRY—500001	500	12 630	5400	610	420	

2.2.6　电缆瓷套

电缆瓷套的规格见表 1.8-28。

表 1.8-28　　电缆瓷套规格

型　号	额定电压(kV)	爬电距离(mm)	主要尺寸(mm)			液压破坏负荷(MPa)	备　注
			总高	外径	内径		
LW—11003	110	22 000	1300	420	250	0.8	LW—户外电缆瓷套
LW—22002	220	4180	2190	550	180	0.8	
LW—22004	220	3740	2200	580	330	1.5	
LW—22006	220	3740	2200	420	230	1.5	
LW—33001	330	3740	3100	435	120	1.5	
LW—33002	330	3740	3170	570	300	1.5	
LW—500—1	500 元件	4250	2200	505	325	1.5	
LW—50001	500	8500	4400	505	325	1.5	

2.2.7　电容器瓷套

电容器瓷套的规格见表 1.8-29。

表 1.8-29　　电容器瓷规格

型　号	额定电压(kV)	爬电距离(mm)	主要尺寸(mm)			备　注
			总高	外径	内径	
RO—1501	15	450	395	448	265	RO—耦合电容器瓷套　RJ—均压电容器瓷套　RM—脉冲电容器瓷套　W—耐污型
RO—3501	35	950	670	260	140	
RJ—4002	40	1470	855	190	100	
RO—5502	55	1210	750	448	265	
RJ—6601	60	1770	1000	190	100	
RO—11001	110	1980	1220	386	216	
ROW—11001	110	2965	1220	406	216	
RJW—15001	150	2220	1300	230	120	
RM—11003	110	1260	780	560	420	
RM—22003	220	1260	800	600	420	
RM—30001	300	870	680	280	180	
RM—40001	400	1260	1500	775	625	

2.2.8　试验变压器瓷套

试验变压器瓷套的规格见表 1.8-30。

表 1.8-30　　试验变压器瓷套规格

型　号	爬电距离(mm)	主要尺寸(mm)			用　途
		总高	外径	内径	
BS—100001	—	650	120	50	100kV 试验变压器用
BS—15001—1	—	740	235	120	150kV 试验变压器用上瓷套
BS—15001—2	—	400	160	70	150kV 试验变压器用下瓷套
BS—500001	1550	1100	610	420	500kV 试验变压器用
BS—50002	2100	1500	550	360	500kV 试验变压器用支柱瓷套
BS—75001	2800	1700	550	360	750kV 试验变压器用支柱瓷套
BS—225001	4250	2150	800	590	2250kV 试验变压器用

2.3　套管

2.3.1　高压穿墙瓷套管

高压穿墙瓷套管用于 6～35kV 交流系统电站和变电所配电装置上，使导体与墙壁（隔板）绝缘和固定，是主绝缘为陶瓷材料构成的一种套管。

带导体套管的型号：

□－□/□－□
- 污秽等级号
- 额定电流(A)
- 额定电压(kV)
- CL— 户内铝导体穿墙套管
- C—户内铜导体穿墙套管
- CWL—户外、户内铝导体穿墙套管
- CWWL—耐污型户外、户内铝导体穿墙套管
- CW—户外、户内铜导体穿墙套管
- CWW—耐污型户外、户内铜导体穿墙套管
- CB—户内圆导杆穿墙瓷套管
- CWB—户外—户内圆导杆穿墙瓷套管
- (其中 B 的抗弯破坏负荷等级，7.5kN)

母线式套管型号：

□－□－□－□
- 污秽等级号
- 内孔直径(mm)
- 额定电压(kV)
- CM— 户内母线式穿墙套管
- CMWW— 耐污型户外、户内母线式穿墙套管

套管的主要电气性能见表 1.8-31。带导体套管的弯曲破坏负荷和热短时电流值见表 1.8-32。母线式套管的弯曲破坏负荷值见表 1.8-33。带导体套管长期最高允许发热温度见表 1.8-34。

表 1.8-31　　套管的电气性能

套管型式	套管额定电压(有效值)(kV)	套管最高电压(有效值)(kV)	工频电压(有效值)，不小于(kV)				雷电冲击耐受电压(峰值)，不小于(kV)
			干耐受(min)	湿耐受①(min)	击穿	可见电晕	
普通型与耐污型	6	6.9	23		58	—	60
	10	11.5	30		75	—	75
	20	23	50		120	14.8	125
	35	40.5	80		176	25.8	185
高原型	10	11.5	37.5		75	—	93.8
	35	40.5	100		176	32.2	231

① 仅对户外—户内套管户外端进行。

表 1.8-32　　带导体套管的弯曲破坏负荷和热短时电流值

套管额定电流(有效值)(A)	额定弯曲破坏负荷(kN)	热短时电流(5s 有效值)不小于(kA)	套管额定电流(有效值)(A)	额定弯曲破坏负荷(kN)	热短时电流(5s 有效值)不小于(kA)
250	4	3.8	630	4	12
400	4	7.2	1000	4	20
1600	4	30	3150	8	60
2000	8	40	>3150	16	—

注　弯曲破坏试验时力施加在长端端帽或瓷件（当没有端帽时）端部。

表 1.8-33　　母线式套管的弯曲破坏负荷值

使用场所	瓷套孔径(mm)	额定弯曲破坏负荷(kN)	使用场所	瓷套孔径(mm)	额定弯曲破坏负荷(kN)
户内	<100	4	户外—户内	150～300	10
	100～200	8		>300	30

表 1.8-34　　带导体套管长期最高允许发热温度

套管各部分名称	最高允许发热温度(℃)	最高允许温升(高出周围温度)(K)	套管各部分名称	最高允许发热温度(℃)	最高允许温升(高出周围温度)(K)
载流或不载流的金属部分(盖、法兰和导电排的非接触部分)及瓷件等	110	70	在空气中的用螺栓压紧的接触连接部分裸铜或裸铝	85	45
			镀银	105	65
			镀锡	95	55

2.3.2　电容套管

电容套管是以一个所谓“电容芯子”为主绝缘的套管，即在导体与中间接地法兰之间加入一个电容芯子。产品尺寸小，重量轻。

油纸电容套管主绝缘由未处理的电缆纸卷绕成“电容芯子”构成，然后再浸以绝缘液体（通常为变压器油）。胶（粘）纸电容套管主绝缘由上胶纸卷绕成的“电容芯子”构成。还有一种胶浸纸套管，其“电容芯子”是在绝缘纸绕成“芯子”后，用低黏度、低损耗、无溶剂的合成树脂浸渍，然后通过加热、加压固化而成。

(1) 油纸电容式穿墙套管用于交流系统额定电压 35～500kV 导体穿过墙壁（隔板）的绝缘和支持（固定）。油纸电容式穿墙套管分水平安装和垂直安装两种，其主要特性见表 1.8-35 和表 1.8-36。

(2) 油纸电容式变压器套管用于交流系统中额定电压 35～500kV 电力变压器、电抗器中导体穿过箱盖的绝缘和固定，套管分长尾套管和短尾套管。

表 1.8-35　　套管的试验电压　　kV

额定电压	最高工作电压 U_m	1min 工频耐受电压（有效值）			雷电冲击耐受电压（峰值）			操作冲击耐受电压（峰值，干或湿）
		内绝缘		外绝缘（干或湿）	全波		截波	
		变压器及电抗器的套管	其他套管		变压器及电抗器的套管	其他套管		
6	6.9	26	23	23	60	60	65	—
10	11.5	37	30	30	75	75	85	—
20	23.0	58	50	50	125	125	140	—

续表

额定电压	最高工作电压 U_m	1min 工频耐受电压（有效值）			雷电冲击耐受电压（峰值）			操作冲击耐受电压（峰值，干或湿）
		内绝缘		外绝缘（干或湿）	全波		截波	
		变压器及电抗器的套管	其他套管		变压器及电抗器的套管	其他套管		
35	40.5	90	80	80	200	185	220	—
63	69.0	147	140	140	325	325	360	—
110	126.0	220	185	185	480	480	530	—
220	252.0	395	360	360	850	850	935	—
		435	395	395	950	950	1050	—
330	363.0	485	460	460	1050	1050	1175	850
		535	510	510	1175	1175	1300	950
550	550.0	660	630	630	1425	1425	1550	1050
		715	680	680	1550	1550	1675	1175
		—	740	740	—	1675	—	—
		电力变压器中性点绝缘套管试验电压						
110	126	105	—	95	250	—	250	—
330	363	255	—	230	550	—	550	—

表 1.8-36　　套管的 tanδ 的最大值

套管主绝缘类型		tanδ 最大值
电容式	油浸纸	0.007
	胶粘纸或胶浸纸	0.010（63kV 及以下套管为 0.015）
	浇铸树脂	0.010
	气体	0.010
非电容式	浇铸树脂	0.020
其他套管		由供需双方商定

2.4　低压线路绝缘子

低压线路绝缘子供工频交流或直流电压 1kV 以下电力线路导线的绝缘和固定用。低压线路绝缘子主要有针式、蝶式、线轴式、拉紧和电车线路绝缘子等。蝶式和线轴式绝缘子还可供低压线路终端、耐张及转角杆上导线绝缘和固定用。拉紧绝缘子作电杆拉线或紧张导线的绝缘和连接之用。低压线路针式绝缘子的规格见表 1.8-37，低压线路蝶式绝缘子的规格见表 1.8-38；低压线路线轴式绝缘子的规格见表 1.8-39，低压线路瓷横担绝缘子的规格见表 1.8-40；线路拉紧绝缘子的规格见表 1.8-41，电车线路绝缘子的规格见表 1.8-42，通信线路绝缘子用于架空通信线路导线的绝缘和固定，其规格见表 1.8-43。

表 1.8-37　　低压线路针式绝缘子

型号	瓷件弯曲负荷（kN）	主要尺寸（mm）				工频电压（kV）		备注
		伞径	瓷件高度	螺纹直径	安装长度	干闪	湿闪	
PD—1T	7.8	80	80	16	35	35	15	T—铁担直脚 M—木担直脚 W—弯脚
PD—1M	7.8	80	80	16	110	35	15	
PD—2T	4.9	70	66	12	35	30	12	
PD—2M	4.9	70	66	12	105	30	12	
PD—2W	4.9	70	66	12	55	30	12	

表 1.8-38　　低压线路蝶式绝缘子

型号	机械破坏负荷（kN）	工频电压（kV）		主要尺寸（mm）		
		湿闪	干闪	伞径	瓷件高度	内孔直径
ED—1	11.8	10	22	100	90	22
ED—2	9.8	9	18	80	75	20
ED—3	7.8	7	16	70	65	16
ED—4	4.9	6	14	60	50	16

表 1.8-39　　低压线路线轴式绝缘子

型号	机械破坏负荷（kN）	工频电压（kV）		主要尺寸（mm）		
		湿闪	干闪	伞径	瓷件高度	内孔直径
EX—1	14.7	9	22	85	90	22
EX—2	11.7	8	18	70	75	20
EX—3	9.8	6	16	65	65	16
EX—4	6.8	5	14	55	50	16

表 1.8-40　　低压线路瓷横担绝缘子

型号	额定电压（kV）	抗弯破坏负荷（kN）	主要尺寸（mm）				
			长度	线槽数	线槽宽	线间距离	安装孔径
SD_1—1	0.5	2.0	537	2	20	400	18
SD_1—2	0.5	2.0	570	2	20	380	18

表 1.8-41　　电车线路绝缘子

型号	结构形式	工频电压（kV）		机械破坏负荷（kN）	主要尺寸（mm）		
		干闪	湿闪		长度	直径	孔径
J—0.5	蛋形	4	2	4.9	38	30	—
J—1	蛋形	5	2.5	9.8	50	38	—
J—2	蛋形	6	2.8	19.6	72	53	—
J—4.5	四角形	20	10	44	90	64	14
J—9	八角形	30	20	88	172	88	25

表 1.8-42 电车线路绝缘子

型号	额定电压 (kV)	机械强度 (kN)		主要尺寸 (mm)		
		拉伸	弯曲	长度	外径	内径
WX—01	0.5	4.9	1.96	75	75	27
WX—02		4.9	1.96	75	115	27
WH—01	0.5	—	—	25	65	23
WH—02		—	—	32	90	28

注 WX—悬挂式电车线路绝缘子；WH—瓷环式电车线路绝缘子。

表 1.8-43 通信线路针式绝缘子规格

型号	绝缘电阻 (MΩ)	机械强度 (kN)	主要尺寸 (mm)			
			高度	直径	螺纹直径	安装长度
TK—2T	20 000	2.94	75	55	M10	30
TK—2M	20 000	2.94	75	55	M10	85
TK—2W	20 000	2.94	75	55	孔 10	55
TK—4T	40 000	5.88	95	60	M12	30
TK—4M	40 000	5.88	95	60	M12	110
TK—4W	40 000	5.88	95	60	M12	60
T—4T	40 000	5.88	95	60	M12	30
T—4M	40 000	5.88	95	60	M12	110
T—4W	40 000	5.84	95	60	M12	70
T—5T	50 000	7.84	112	76	M16	35
T—5M	50 000	7.84	112	76	M16	110
T—5W	50 000	7.84	112	76	孔 16	70
T1—5T	50 000	7.84	130	76	M16	35
T1—5M	50 000	7.84	130	76	M16	110
T1—5W	50 000	7.84	130	76	M16	85

注 T—螺纹连接的通信线路针式绝缘子；TK—胶装的通信线路针式绝缘子；T、M、W—分别表示铁担直角、木担直角和弯角安装连接。

2.5 玻璃绝缘子及材料

玻璃是优良的绝缘材料，其绝缘强度比瓷材料好，但是普通玻璃的力学性能和热冷急变性能差，不适宜于制造输电线路用的绝缘子、绝缘套管等。

玻璃经过特殊的热处理—钢化，就会在玻璃表面形成永久性的预压应力，当玻璃被加热到接近软化温度，并受到骤冷时，其外表层首先发生收缩、硬化，而内层仍然较热，处于塑性状态，阻止外层收缩，此时外层受张应力作用，内层受压应力作用；当继续冷却时，具有塑性的内层继续冷却，但是外层呈现压应力，内层呈现张应力；当玻璃冷却到室温后，这些应力便永久地分布在玻璃体中。这种预加在玻璃表面的压应力提高了玻璃的力学性能和冷热急变性能，因此用钢化玻璃制造的绝缘子，其机械强度、电气性能和热性能等可以满足使用上的要求。它还具有生产周期短，使用维护简便，可靠性高的特点，获广泛应用。表 1.8-44 分别列出钢化玻璃材料和瓷材料的性能，以资比较。

玻璃主要含 SiO_2 的酸性氧化物与含 NaO_2、K_2O 等盐基性氧化物组成。选用的原料是含有上述成分的石英砂、长石、纯碱、碳酸钾，还有其他天然原料和少量作为澄清剂和氧化剂的辅助材料，有些成分中还含碱土金属氧化物，如 BaO 等。

表 1.8-44 钢化玻璃材料和瓷材料的性能比较

名称	体积密度 (g/cm^3)	拉伸强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	电气强度 (20℃) (MV/m)	相对介电常数 (50Hz，20℃)	介质损耗因数 (50Hz，20℃)	表面电阻率 (20℃) (Ω)	体积电阻率 (20℃) (Ω·cm)	冷热急变性 (K)
钢化玻璃	2.4～2.6	80～90	68～74	35～50	7～9	2×10^{-3}～9×10^{-3}	$\geqslant10^{14}$	$\geqslant10^{14}$	≥200
瓷（无釉）	2.4～2.8	35～50	80～120	25～40	6～8	10×10^{-3}～30×10^{-3}	$\geqslant10^{13}$	$\geqslant10^{13}$	≥150

钢化玻璃有高碱、低碱和硼硅酸盐玻璃 3 种。制造钢化玻璃绝缘子，多采用高碱玻璃，即以二氧化硅钙和氧化钠为主要成分的钠钙硅酸盐玻璃，这种玻璃的优点为：

(1) 钢化能力系数 K 大，为 400～500N/mm，钢化后可形成比低碱玻璃和硼硅酸盐玻璃大得多的压应力，为制造小尺寸、高强度的绝缘子提供了有利条件。

(2) 平均线膨胀系数大，为$(8\times10^{-6}\sim9\times10^{-6})K^{-1}$与胶装用的水泥胶合剂，金属附件的平均膨胀系数接近，可使绝缘子有好的冷热急变性能。

(3) 熔融、成型和钢化温度都比较低，易于熔化、易于成型，制造工艺性能好。

(4) 原料来源广泛，生产成本低。

钢化玻璃绝缘子用高碱硅酸盐玻璃的化学成分（质量分数）范围见表 1.8-45。

表 1.8-45 绝缘子用高碱硅酸盐玻璃的化学成分

玻璃类别	化学成分（质量分数）(%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	BaO	K_2O	Na_2O	SO_3
单碱玻璃	72.0～73.0	1.0～3.0	0.1～0.5	6.0～10.5	2.5～4.0	—	—	13.5～15.0	0.3～0.5
双碱玻璃	68.0～72.5	2.0～5.0	0.1～0.5	5.5～8.0	2.0～4.0	0.0～3.5	1.0～4.0	9.0～13.0	0.3～0.5

两种高碱硅酸盐玻璃中，一种是单碱玻璃，其化学成分中只含有一种金属氧化物—Na_2O，而双碱玻璃则含有两种碱金属氧化物—BaO。在双碱玻璃中由于用一部分 K_2O 代替了一部分 Na_2O，或还加入了 BaO，降低了导电能力大的 Na^+ 离子的浓度，从而提高玻璃材料的电气性能，其原因是 7.5.2 节提到过的“中和效应”和“压抑效应”。实践得出，当双碱玻璃化学成分中 K_2O/K_2O+Na_2O 的摩尔数比值在 0.15 左右时，玻璃材料 20～100℃时的介质损耗因数和体积电阻率都优于单碱玻璃材料；如果在双碱玻璃化学成分中再加入一定量的碱土金属氧化物，则电气性能可进一步改善。

2.6 有机复合绝缘子及其材料

2.6.1 有机复合绝缘子的特点

有机复合绝缘子与瓷、玻璃绝缘子不同，是一种具有复合结构的新型绝缘子。主要由芯棒、伞裙、护套（或无护套）、金属附件等部分组成。其特点是将绝缘子应具备的机械强度，内外绝缘性能，由不同的绝缘材料承担。有机复合绝缘子与瓷、玻璃绝缘子比较，其优点为：

(1) 耐污性能好。有机复合绝缘子伞裙材料具有憎水性，成品杆径比较细长，污秽分布均匀，污闪电压比相同爬距的瓷、玻璃绝缘子高 1 倍以上。

(2) 机械强度高。芯棒是有机复合绝缘子中承受机械负荷的部件，由环氧树脂粘合玻璃纤维制成，其拉伸强度为瓷料的 5～10 倍。

(3) 质量轻、体积小。有机复合绝缘子除两端胶装的金

具外，其他材料的体积密度都比较小，因此整个绝缘子重量较轻，只有同等电压等级瓷绝缘子重量的 1/5～1/10。

（4）尺寸标准。伞结构柔韧性好。有机复合绝缘子由控制好尺寸的各种部件粘接或整体模压工艺制造，尺寸精确。其伞裙材料是橡胶，富有弹性，能耐受枪击而不碎，并运输安全方便。

（5）线路维护工作量小。瓷悬式绝缘子结构属于可击穿型，存在零值击穿问题；为防止污闪，瓷的和玻璃的悬式绝缘子都需要定期逐只清扫。有机绝缘子的内、外绝缘基本相同，一般不发生零值击穿。伞裙材料是憎水性的，通常不需要清扫，因此减少了线路维护的工作量。

2.6.2　有机复合绝缘子性能

有机复合绝缘子的性能见表 1.8-46 和表 1.8-47。

表 1.8-46　　电气化铁道接触网用有机复合绝缘子

型号	额定电压（kV）	结构高度（mm）	爬电距离（mm）	额定机械破坏负荷（kN）		工频湿耐受电压（kV）	雷电冲击耐受电压（kV）	0.4mg/cm² 污秽耐压（kV）	质量（kg）
				抗拉	抗弯				
FQX_1—25	25	650	1400	60	—	130	270	40	2.1
FQX_1—25	25	930	1400	60	—	130	270	40	2.8
FQB_1—25	25	760	1400	—	4	130	270	40	3.0

表 1.8-47　　电力线路用有机复合棒形悬式绝缘子

型号	额定电压（kV）	结构高度（mm）	爬电距离（mm）	额定机械抗拉破坏负荷（kN）	工频湿耐受电压（kV）	雷电冲击耐受电压（kV）	0.4mg/cm² 污秽耐压（kV）	质量（kg）
FQB_1—110	110	1170	2830	70	200	480	73	6.25

2.6.3　有机复合绝缘子使用注意事项

（1）有机复合绝缘子除非严重积污，一般不宜经常擦洗，并切勿用尖锐物剔刮绝缘子上的污积。

（2）严禁坐或踏伞盘、均压环，或用重物压绝缘子，以免损伤伞裙。

（3）有机绝缘子虽有优良的耐酸、碱能力，但应避免用于强酸、强碱等强腐蚀的环境。

2.7　电器设备及电子装置用陶瓷

2.7.1　滑石瓷

滑石瓷由天然滑石和黏土等配方组成。其显微结构由原顽辉石（$MgO \cdot SiO_2$）主晶相、玻璃及气孔组成。滑石瓷的介电常数低（一般 $\varepsilon_r = 6 \sim 7$）；介质损耗因数低［波动于（3～20）$\times 10^{-4}$］，绝缘强度通常为 20～30MV/m，体积电阻率高（100℃下的体积电阻率约为 $10^{14}\,\Omega \cdot cm$），静态弯曲强度为 120～200MPa，化学稳定性能好，耐酸、耐碱、耐腐蚀。滑石瓷突出的优点是介电常数随频率升高而降低，而且高频下随温度的升高变化很小，如图 1.8-5 所示，$\tan\delta$ 在 $f = 10^6$ Hz 以前也是随频率升高而降低，如图 1.8-6 所示，所以用作高频装置瓷时充分显示了滑石瓷的优点。

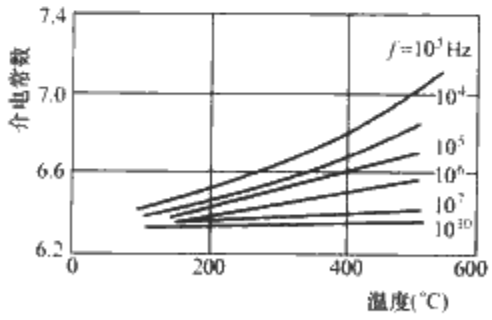


图 1.8-5　滑石瓷的介电常数随温度和频率的变化

滑石瓷也存在缺点，在滑石瓷的生产中，如果原料、配方或生产工艺不当，往往会出现在放置或使用过程中的粉化、强度降低、介电性能恶化等现象，常称之为滑石瓷的老化。其原因是滑石瓷由于高温晶相原顽辉石在冷却、放置、使用过程中向顽火辉石或斜顽辉石的转化，可通过改进配方和制造工艺解决。

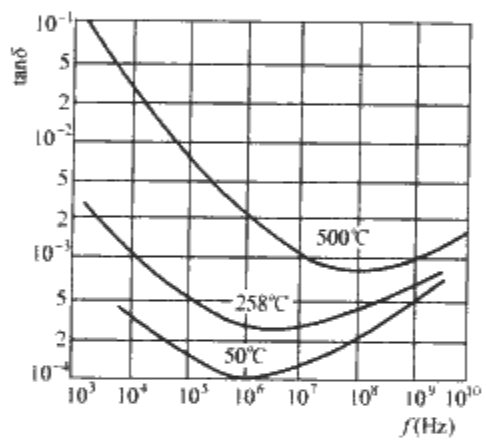


图 1.8-6　滑石瓷的介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 随温度和频率的变化

滑石瓷的组成与性能如表 1.8-48 及表 1.8-49 所示。

滑石瓷的用途。在电工上主要用以制造管式熔断器瓷管、熔断器底座等熔断器瓷件及低压电器用绝缘零件。在高频电子装置中应用极广，如用于制造高压高功率电容器、绝缘子、波段开关，电子管座、电感线圈骨架、电容器支柱等。

2.7.2　高铝瓷

2.7.2.1　组成与性能

高铝瓷是指化学成分中 Al_2O_3 含量大于 75%的氧化铝陶瓷，Al_2O_3 含量为 75%、85%、90%、99%的高铝瓷依次称为“75 瓷”、“85 瓷”、“90 瓷”、“99 瓷”。常用高铝瓷的配方组成与化学组成见表 1.8-50、表 1.8-51。

高铝瓷不论在低频或高频下均有优良的电气性能，如低的 $\tan\delta$，高的绝缘电阻，高的机械强度和硬度，良好的耐磨性和耐化学腐蚀性，线膨胀系数不大，耐热性能好。图 1.8-7、图 1.8-8、图 1.8-9 所示为高铝瓷的介电性能随温度和频率的变化情况，为进行对比，也示出了 BeO 瓷的上述性能。表 1.8-52 示出高铝瓷的性能，由上述图表可见，随瓷件中 Al_2O_3 含量提高，机械强度提高，$\tan\delta$ 下降。

表 1.8-48 滑石瓷材料配方组成（质量分数）示列 %

代号	煅烧滑石	生滑石	黏土	膨润土	碳酸镁	碳酸钡	氧化铝	氧化锆	氧化锌	长石	烧成温度（℃）
MS_1	60.0	24.4	3.9	—	—	7.8	—	3.9	—	—	1350±20
MS_2	60.0	24.0	5.0	—	—	10.0	1.0	—	—	—	1320±20
MS_3	50.0	17.0	7.0	4.0	8.0	10.0	—	—	4.0	—	1270±20
MS_4	60.0	10.0	15.0	—	7.0	2.0	—	—	—	6.0	1370±5

表 1.8-49 滑石瓷材料的性能和试验方法

性能名称	单位	几种瓷材料性能指标						试验方法		
						GB/T 5593—1996		试样形状和尺寸	试验方法	试品数（个）
		MS_1	MS_2	MS_3	MS_4	MS—1	MS—2			
密度	g/cm^3	2.95	2.80	—	—	2.70	2.60	按 GB/T 2413—1980 规定		3
液透性（185MPa·h）		—	—	—	—	通过		产品上切割的任意形状大小的瓷块、釉面面积不大于 25%	碱性品红和工业酒精配制的 1%品红溶液	3
弯曲强度	N/mm	140～150	140～150	≥150	≥120	≥140	≥120	ϕ7mm×65±5mm 或 7mm×7mm×（65mm±5mm）	三点抗弯法测定，跨距 50mm，负载加在试样中心部位	10
平均线膨胀系数（20～100℃）	$10^{-6}K^{-1}$	7.0～7.56	6.0～7.0	—	—	≤8.0		按试验仪器的规定	升温速度不超过 5℃/min	2
相对介电常数（1MHz，20℃）		6.0～6.55	5.0～7.0	—	<7.0	≤7.5		ϕ(35mm±5mm)×(2mm±0.5mm)	电压不大于 5V，测试误差不大于 2%的任何方法及仪器	10
介质损耗因数（1MHz，20℃）	10^{-4}	6.0～8.07	7.0～8.0	3.0～5.0	12.0～30.0	≤8.0	≤20.0		利用谐振电路，平衡或不平衡电桥测量	
电气强度	MV/m	≥20	≥20	—	≥20	—		ϕ(35mm±5mm)×(1.5mm±0.5mm)	连续均匀升压法直至试样击穿，升压速度≤1000V/s	5
体积电阻率（100℃）	Ω·cm	$\geq10^{12}$	10^{12}～10^{13}	—	$\geq10^{12}$	—		ϕ(35mm±1mm)×(2mm±0.5mm)	高阻表或检流计，高阻测量范围 10^5～$10^{17}\Omega$，测量误差<±15%	

表 1.8-50 高铝瓷材料的配方组成（质量分数） %

材料名称	Al_2O_3	SiO_2	黏土	滑石	石灰石	$MgCO_3$	$CaCO_3$	$BaCO_3$
A-75（75%Al_2O_3 瓷）	65	24	2	2	3	—	—	4
A-90～93（90%～93%Al_2O_3 瓷）	92.2	2.1	—	3.9	—	—	1.8	—
A-95（95%Al_2O_3 瓷）	93.5	1.28	1.95	—	—	—	3.27	—
A-95（95%Al_2O_3 瓷）	95	—	2	3	—	—	—	—
A-95（95%Al_2O_3 瓷）	95	0.63	—	3.75	—	—	0.63	—
A-99（99%Al_2O_3 瓷）	99	—	0.75	—	—	0.25	—	—

表 1.8-51 高铝瓷材料的化学组成（质量分数） %

材料名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	BaO	R_2O
A-75（75%Al_2O_3 瓷）	14.25	73.83	0.38	0.25	1.85	0.65	3.13	0.53
A-90～93（90%～93%Al_2O_3 瓷）	4.92	91.56	0.16	—	1.01	1.64	—	0.32
A-95（95%Al_2O_3 瓷）	2.50	94.70	0.10	痕	2.50	痕	—	0.20
A-99（99%Al_2O_3 瓷）	0.30	99.28	0.14	痕	痕	0.37	—	0.35

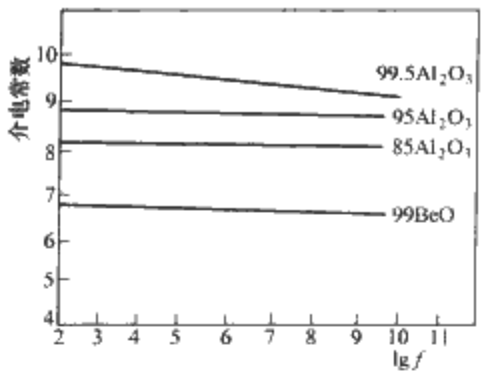


图 1.8-7　高铝瓷（及 BeO 瓷）介电常数随频率的变化

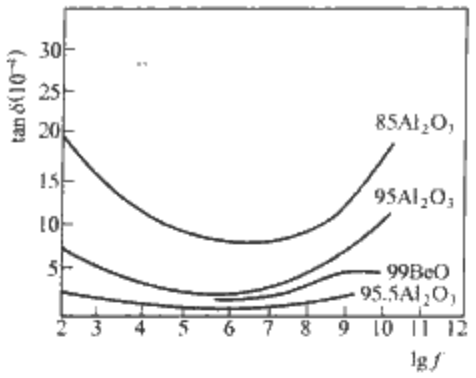


图 1.8-8　高铝瓷（及 BeO 瓷）tanδ 随频率的变化

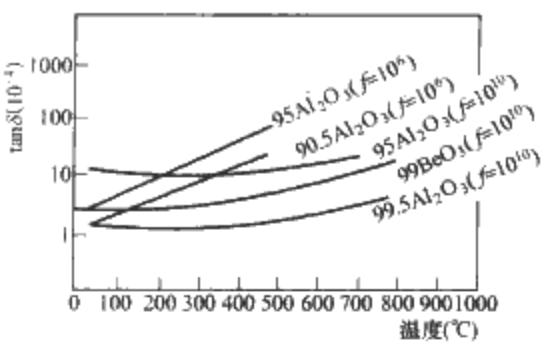


图 1.8-9　高铝瓷（及 BeO 瓷）在 10^6 Hz 和 10^{10} Hz 下的 tanδ 随温度的变化

表 1.8-52　　高铝瓷材料的性能

性能名称		单位	A—75（75%[①] Al_2O_3 瓷）	A 90（90%[①] Al_2O_3 瓷）	A—95（95%[①] Al_2O_3 瓷）	A—99（99%[①] Al_2O_3 瓷）
密度		g/cm^3	＞3.20	＞3.40	＞3.60	＞3.70
气密性		—	—	通过	通过	通过
透液性（185MPa·h）		—	通过	通过	通过	通过
弯曲强度		N/mm	200	230	280	300
弹性模量		GPa	—	250	280	—
泊松比		—	—	0.20～0.25	0.20～0.25	—
抗热震性		—	—	通过	通过	通过
平均线膨胀系数	20～100℃	$10^{-6}K^{-1}$	＜6	—	—	—
	20～500℃		—	6.3～7.3	6.5～7.5	6.5～7.5
	20～800℃		—	6.3～7.3	6.3～8.0	6.5～8.0
电气强度		MV/m	≥20	≥15	≥15	≥15
相对介电常数	1MHz20℃	—	＜9	9～10	9～10	9～10.5
	1MHz500℃		—	—	9～10	—
	10GHz20℃		—	9～10	9～10	9～10.5
介质损耗因数	1MHz20℃	10^{-4}	≤10	≤6	≤4	≤2.5
	1MHz500℃		—	—	30～40	—
	10GHz20℃		—	—	≤10	≤6
体积电阻率	100℃	Ω·cm	$>10^{12}$	$>10^{13}$	$>10^{13}$	$>10^{13}$
	300℃		—	$>10^{10}$	$>10^{10}$	$>10^{10}$
	500℃		—	—	$>10^{5}$	$>10^{9}$
化学稳定性	1：9HCl	g/cm^2	—	—	≤7.5	≤0.7
	10%[①] NaOH		—	—	≤0.2	≤0.1
物相组成[①] 刚玉—莫来石晶相 刚玉晶相 玻璃相		%	80～90 — 10～20		— 80～100 ＜20	

① 均指质量分数。

2.7.2.2　用途

高铝瓷由于其材料性能优良，在电工、电子技术中获广泛应用。在电工技术中常用作真空断路器壳体、各种熔断器瓷件、汽车火花塞、电除尘器、家用电器等高温耐热绝缘件。电子技术中广泛用作真空电容器陶瓷管壳、大功率栅控金属陶瓷管、微波管的陶瓷管壳、微波管输能窗的陶瓷组件、各种陶瓷基片及半导体集成电路陶瓷封装管壳等。

2.7.3　高导热陶瓷

随着电子设备和系统功能的日益提高，电子器件向高密度多功能、快速化和大功率方向发展。电工电力设备，随着向超高电压、大容量发展，散热问题成为突出的矛盾，要求发展高导热绝缘材料。目前应用较多的是直接采用高导热陶瓷或在高分子材料中加入高热导率无机填料，提高复合材料的导热率。

高导热晶体材料的共同结构特点是由原子量较低的元素构成的共价键或共价键很强的单质晶体或一些二元化合物。常见的热导率在 2W/（cm·K）以上的非金属晶体见表 1.8-53，为了便于对比，表中也列出了高热导率金属铜和铝的热导率值。

表 1.8-53 几种高纯单晶体 300K 下的热导率①

材 料	晶体结构	热导率 λ [W/(cm·K)]
金刚石	金刚石	20
石墨	石墨	20(⊥c 轴)
立方 BN	闪锌矿	(13)
SiC	闪锌矿	4.9
BeO	纤锌矿	3.7
BP	闪锌矿	3.6
AlN	铅锌矿	2(3.2)
立方 BN	类石墨(层状)	2(⊥c 轴)
铜	立方密堆积	4
铝	立方密堆积	2.4

① 对于纤锌矿结构的晶体（BeO 和 AlN）的数值为沿 c 轴和 a 轴方向的平均值；括号内的数值为估计值。

目前金刚石和立方 BN 的价格非常昂贵。石墨不能用来制备电绝缘材料。BP 对杂质的敏感性非常强，微量杂质能使材料的热导率降低好几个数量级，难以制备热导率较高的陶瓷材料。所以，目前用于制造高热导率电绝缘陶瓷材料常用的只有 BeO、立方 BN、AlN、SiC 等。此外 Al_2O_3 的热导率虽不如上述材料，但价格便宜，易得，因此为提高绝缘材料热导率常加入 Al_2O_3 微粉。表 1.8-54 列出高导热陶瓷的性能及应用实例。

表 1.8-54 高导热陶瓷的性质

续表

材料主要成分		氧化铍 BeO	氮化铝 AlN	氮化硼 BN
导热系数 [W/(m·K)]	25℃	243	175	56.94
	300℃	83.74	135	
电气强度（MV/m）		>15		
体积电阻率 ρ（Ω·m）	20℃	$>10^{12}$	2×10^{11}	$>10^{12}$
	500℃	$>1\times10^{8}$	$>7\times10^{7}$	$>2.3\times10^{8}$
介电常数，ε（1MHz）		6.5	8.7	4.0
介质损耗因数，$\tan\delta$（1MHz）		0.000 1	0.003 3	0.000 8
特点与应用实例		大功率激光管，电子装置散热部件等	集成电路基片及电子装置散热部件	电加热器的绝缘子，高温高压绝缘散热片，大规模集成电路及微波管等

材料主要成分	氧化铍 BeO	氮化铝 AlN	氮化硼 BN
密度（g/cm³）	≥2.80	≥3.26	≥1.7
压缩强度（MPa）	≥150	≥2100	≥57
弯曲强度（MPa）	≥175	≥270	≥45
弹性系数（GPa）	≥300	≥350	≥100
线膨胀系数（℃⁻¹） 25～300℃ 25～700℃	6.8×10^{-6} 8.4×10^{-6}	4.8×10^{-6}	2.0×10^{-6}

2.7.4 灭弧罩陶瓷

灭弧罩在低压电器中被广泛地用作熄灭电弧的消弧器。要求使用灭弧性能好、能承受强大的机械冲击、耐高温和具有良好的耐温度急变性的绝缘材料。常用的无机材料为堇青石陶瓷和改性的堇青石陶瓷，它的平均线胀系数很小［(1～2) $\times10^{-6}K^{-1}$］，堇青石晶体为主晶相。表 1.8-55 列出灭弧罩陶瓷材料的组成与性能，配方中序号 1 的主晶相为堇青石，其特点是平均线膨胀系数特低，但机械强度较低。序号 2 加大了工业氧化铝含量，除堇青石外还有莫来石晶体，线膨胀系数稍高，但力学性能有所提高，常用作配电系统接触器灭弧陶瓷件。序号 3 含更多的工业氧化铝，主晶相由堇青石、刚玉、莫来石组成，具有较低的吸水率，较高的体积密度和机械强度，常用于制造防爆开关、快速开关、灭弧罩、电气机车大容量灭弧罩陶瓷件。灭弧罩性能标准及试验方法见表 1.8-56。

表 1.8-55 灭弧罩陶瓷材料的组成与性能

矿物组成（质量分数）（%）				化学成分（质量分数）（%）						性能					结晶相含量（%）
黏土	工业氧化铝	滑石	其他	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	R_2O	其他	烧成温度（℃）	吸水率（%）	密度（g/cm³）	弯曲强度（MPa）	平均线膨胀系数（$10^{-6}K^{-1}$）	
39.3	12.8	47.9	—	52.8	31.2	16.0	—	—	—	1400	—	—	—	1.0	堇青石>96
30.0	25.0	20.0	25.0	42.7	48.1	6.2	0.2	0.5	2.1	1350	13.6	1.99	56.0	3.6	堇青石 50 莫来石若干
30.0	55.0	10.0	5.0	25.4	67.4	5.4	1.4	0.5	—	1350	9.0	2.45	—	4.2	堇青石 30 刚玉、莫来石若干

表 1.8-56 灭弧罩陶瓷材料性能及实验方法

性能名称	单位	性能指标	实验方法		
			试样形状和尺寸	试验方法	试样数（个）
开口孔隙率	%	≤20	陶瓷件碎块或方形棒碎块，每块质量 20～27g	水中煮沸方法测定	3
体积密度	g/cm³	≥1.9			

续表

性能名称		单位	性能指标	实验方法		
				试样形状和尺寸	试验方法	试样数（个）
弯曲强度		MPa	≥30(>50)①	方形棒长 120mm±2mm 宽 10mm±0.5mm 高 10mm±0.5mm	3 点抗弯方法测定，跨距 100mm 负载加在试样中心部位	10
冲击强度		kJ/m²	≥1.3(>1.8)①	矩形棒长 120mm±2mm 宽 10mm±0.5mm 高 15mm±0.5mm	摆锤式试验机，跨距 60mm±0.5mm	10
弹性模量		GPa	≥40	同序号 3	3 点抗弯方法测定，计算试样破坏时记录下的挠度求得	3
平均线膨胀系数	20～100℃	$10^{-6}K^{-1}$	1.5～3.5	按试验仪器的规定	升温速度不超过 5℃/min	3
	20～300℃					
	20～600℃		2.0～4.0			
	20～1000℃		2.5～5.0			
比热容(20～100℃)		J/(kg·K)	750～900	按试验仪器的规定	按试验仪器的规定	3
热导率(20～100℃)		W/(m·K)	1.3～1.8			
耐冷热急变性		K	≥300	同序号 3	每经一轮冷热循环后，即将试样在 120℃±5℃的温度下烘干，用 3 点抗弯法测定弯曲强度，直至测出的强度值减小到未经冷热处理试样强度值的 2/3 为止	10
耐电弧性		级	L_3～L_6	圆片：φ100mm×4mm	耐电弧试验机，输出直流空载电压 220V，负载电阻 2Ω	5
体积电阻率	200℃	Ω·cm	>10^9	圆片：φ100mm×4mm 平面度≤0.05mm	三电极系统，铂电极。按 GB/T 1410 规定的高阻计或检流计测量，1000℃高温炉，升温速度小于或等于 5℃/min	5
	600℃		>10^5			
10^6Ω·cm 体积电阻率对应温度		℃	500			
通断能力、电寿命、机械寿命			应符合相应低压电器产品标准要求			

① 括弧中数字是较高强度灭弧罩陶瓷件及陶瓷材料的推荐指标，如热压铸陶瓷件及其材料。

2.7.5　陶瓷电容器材料

电介质陶瓷主要用来制造电容器的介质材料。根据不同的用途，目前主要有铁电介质陶瓷、高频介质陶瓷、半导体介质陶瓷、微波介质陶瓷等。电介质陶瓷根据国家标准分为Ⅰ类陶瓷介质、Ⅱ类陶瓷介质、Ⅲ类陶瓷介质。Ⅰ类陶瓷介质主要用于制造高频电路中使用的陶瓷电容器；Ⅱ类陶瓷介质主要用于制造低频电路中使用的陶瓷电容器；Ⅲ类陶瓷介质也称为半导体陶瓷材料，主要用于制造汽车，电子计算机等电路中要求体积非常小的陶瓷电容器，其特点是视在介电常数高达七千到几十万。

2.7.5.1　高频介质陶瓷

高频介质陶瓷要求具有比较高的介电常数，一般要求在 8.5 到 900 内，在高频（1MHz）下的介质损耗小于 6×10^{-4}，介电常数温度系数变化范围宽，可以调节。高频介质陶瓷主要由碱金属和稀土金属的钛酸盐和它们的固溶体组成。高频电容器的Ⅰ类陶瓷介质和Ⅱ类陶瓷介质部颁标准见表 1.8-57 和表 1.8-58，Ⅱ类型号对比见表 1.8-59。

表 1.8-57　　Ⅰ类分规范

GB/T 5966—1996Ⅰ类分规范

标准温度系数（$10^{-6}℃^{-1}$）	温度系数允许偏差（$10^{-6}℃^{-1}$）	等级	字母代码		温度系数的色码
			α	允许偏差	
+100	±15	1A	A	F	红+紫
	±30	1B		G	
0	±15	1A	C	F	黑
	±30	1B		G	
	±60	1F		H	

续表

GB/T 5966—1996 Ⅰ类分规范					
标准温度系数 ($10^{-6}℃^{-1}$)	温度系数允许偏差 ($10^{-6}℃^{-1}$)	等级	字母代码		温度系数的色码
			α	允许偏差	
−33	±15	1A	H	F	棕
	±30	1B		G	
−75	±15	1A	L	F	红
	±30	1B		G	
−150	±15	1A	P	F	橙
	±30	1B		G	
	±60	1F		H	
−220	±15	1A	R	F	黄
	±30	1B		G	
−330	±30	1A	S	G	绿
	±60	1B		H	
−470	±30	1A	T	G	蓝
	±60	1B		H	
−750	±60	1A	U	H	紫
	±120	1B		J	
	±250	1F		K	
−1000	±60	1A	Q	H	红＋黄
	±120	1B		J	
	±250	1F		K	
−1500	±250	1F	V	K	橙＋橙
−2200	±500	1F	K	L	黄＋橙
−3300	±500	1F	D	L	绿＋橙
−4700	±1000	1F	E	M	蓝＋橙
−5600	±1000	1F	F	M	黑＋橙
$+140 \geqslant \alpha \geqslant -1000$	5	1C	SL	—	灰
$+250 \geqslant \alpha \geqslant -1750$	5	1D	UM	—	白

表 1.8-58　　Ⅱ类分规范

GB/T 5968—1996 Ⅱ类分规范	
等级字母代码	不施加直流电压在类别温度范围内相对于 20℃时电容量最大变化，%
2B	±10
2C	±20
2D	+20/−30
2E	+20/−56
2F	+30/−80

表 1.8-59　　Ⅱ类型号对比

GB/T 5968—1996 (JEC60384)	JIS—C—6422	IEC—PUB—187	EIA—RS—198—0
2B	YB	4B	Y5P，Z5P
2C	YD	4C	Y5T，Z5T
2D	YE	4D	Y5U，Z5U
2E	YF	4F	Y5V，Z5V
2F	ZF	5F	Z5V

注　1. 美国 EIA 中：Y—−30℃，5—+85℃，Z—+10℃，P—±10%，T—$^{+22\%}_{-33\%}$，U—$^{+22\%}_{-56\%}$，V—$^{+22\%}_{-82\%}$。

2. ZF（5F）为−10℃～+70℃时，$^{+30\%}_{-30\%}$。

高频陶瓷电容器又可分为：① 高频温度补偿电容器陶瓷，其介电常数温度系数一般为负值，可以补偿振荡回路中电感的正温度系数，使得谐振频率稳定。金红石陶瓷、钛酸钙陶瓷、钛酸锶陶瓷、硅酸钙陶瓷属高频温度补偿电容器陶瓷。② 高频热稳定电容器陶瓷，其介电常数温度系数绝对值小，接近零。高稳定电容器用于精密电子仪器。通常采用正温度系数和负温度系数的瓷材料来配制。使得温度系数变得很小，如钛酸镁瓷、镁镧钛瓷、锡酸钙瓷。

常用的高频瓷的组成和电性能见表 1.8-60。

表 1.8-60　　高频介质瓷的组成和电性能

陶瓷	组成（%）	ε_r（0.5～5MHz）	TKε（$℃^{-1}$）	tanδ（1MHz）	特点与用途
金红石瓷	87TiO_2，5ZrO_2，5黏土，2$BaCO_3$	70～80	$(-750\pm50)\times10^{-6}$	$(2\sim4)\times10^{-4}$	较大的ε_r，较小的tanδ，常用于高功率电容器件，微调电容器等
钛酸钙	99$CaTiO_3$，1ZrO_2	140～150	$(-1300\pm200)\times10^{-6}$	$<6\times10^{-4}$	ε_r高，TKε较大，常用于高频温度补偿电容器
钛酸镁	94（2MgO·TiO_2），5黏土，1CaF_2	14	60×10^{-6}	$<3\times10^{-4}$	不大的TKε，与负温度系数晶适当配比，可制成温度补偿电容器
镁镧钛	32.1La_2O_3，12.5$MgCO_3$，55.4TiO_2	13	-33×10^{-6}	$<1.3\times10^{-4}$	tanδ小，用于热稳定电容器，可以在150℃高温下使用
	35.3La_2O_3，22.1$MgCO_3$，42.6 TiO_2	33	$+33\times10^{-6}$	$<1.6\times10^{-4}$	
锡酸钙	90.5$CaSnO_3$，7.5膨润土，2ZrO_2，外加3$CaTiO_3$		$14\sim16\times10^{-6}$	$(4\sim6)\times10^{-4}$	TKε小，作高频热稳定电容器

2.7.5.2　微波介质材料

近年来，以微波通信和光通信为代表的现代通信技术迅速发展，对微波设备的小型化提出极为迫切的要求，而微波电路向集成化的方向发展，在一定程度上依赖于微波介质材料的发展。微波介质材料主要用来制造介质谐振器、微波集成电路芯片、元件、介质波导、介质天线、输出窗、衰减器、匹配终端行波器夹持棒等微波器件。对微波材料主要性能要求如下：

（1）适当大些的介电常数，以减少器件尺寸。

（2）尽可能高的品质因素 Q，以保证优良的选频特性。

（3）谐振频率的温度系数 T_f 要尽可能的小，以保证高的稳定性。

目前已实用化的微波介质陶瓷材料大致可归纳如下几类：

（1）使用8GHz频率以上的、具有高Q特征的复合钙钛矿类材料，如 Ba（$Mg_{1/3}Ta_{2/3}$）O_3。

（2）使用4～8GHz频率范围的、具有高 Q 值和 ε_r 的 $BaO—TiO_2$ 系材料，如 $Ba_2Ti_9O_{20}$，$BaTi_4O_9$。

（3）使用0.8～4GHz频率范围内的具有高 ε_r 特征的钨青铜结构 $Ln_2O_3-BaO-TiO_2$ 系材料，如 $Ba_{6-3x}Ln_{8+2x}Ti_{18}O_{54}$。

表1.8-61列出几种典型的微波介质谐振器材料及其主要性能。

表 1.8-61　　几种典型的微波介质谐振器材料及其主要性能

材　料	介电常数 ε_r	Qf[①]（GHz）	测试频率 f_0（GHz）	频温系数 τ_f（$\times10^{-6}$）（K）
$CaTiO_3-MgTiO_3$	21	56 000	7	0
$Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O_3$	30	168 000	12	0
$Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$	25	350 000	10	−4
$Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O_3-(Ba,Sr)(Ga,Ta)O_3$	32	190 000	10	0
$BaTi_4O_9$	40	36 000	4	15
$Ba_2Ti_9O_{20}$	40	36 000	4	5
$BaTi_4O_9-WO_3$	35	50 400	6	−0.5
$(Zr,Sn)TiO_4$	38	49 000	7	0
$BaSm_2Ti_5O_{14}$	78	8000	2	21
$BaNd_2Ti_5O_{14}$	89	4000	2	−50
$Ba_2O_3-BaO-Nd_2O_3-TiO_2$	88	2000	4	0
$(Pb,Ca)ZrO_3$	105	3600	3	3.7
$PbO-BaO-Nd_2O_3-TiO_2$	90	5200	1	3

① Qf 是 TE_{018} 模在 f_0 测到 Q 值和 f_0 的乘积。

2.7.6　铁电陶瓷介质

铁电陶瓷以钛酸钡为基本成分。钛酸钡晶体在一定的温度范围内即使不加外电场，其晶体内每一个小区域中所有晶胞的自发极化方向相同，形成电畴。由于存在自发极化，钛酸钡材料具有很高的介电常数。钛酸钡的自发极化强度随温度发生强烈的变化，因此介电常数随温度变化很大；钛酸钡自发极化方向可通过电畴的反转而改变，加上电场后使自发极化沿电场方向取向；并且伴随大的能量损耗，因此介质损耗因数较大。钛酸钡晶体在120℃（即居里温度）左右出现介电常数最大值可达上万，而室温附近的工作温度范围介电常数只有几千，且随温度变化很大，为此常加入移峰剂使居里点移至常温附近，加入压降剂，使介电常数随温度变化变得平坦。常用的移峰剂有 $BaSnO_3$、$BaZrO_3$、$CaZrO_3$、CaS-

nO_3、$SrTiO_3$、$PbTiO_3$、La_2O_3。常用的压降剂有 $CaTiO_3$、$MgTiO_3$、$Ba_2(SnO_3)_3$、$Bi(TiO_3)_3$、BaO、CaO、MgO 及稀土金属氧化物。

铁电陶瓷介质主要用做大容量小体积低频陶瓷电容器，如做滤波、旁路、耦合等，在电子装置中应用极为广泛。

由于陶瓷电容器具有容量大，绝缘强度高、体积小；可靠性高等特点，发展了一批高压陶瓷电容器。除了在高压电子装置如激光器、彩色电视机等中获得广泛应用外，在电力工业也获得许多应用，如 500kV 避雷器中用陶瓷电容器与氧化锌阀片并联，电容器起到了电位补偿作用，均匀了电压分布。SF_6 断路器中将电容器并联于主断口，在多断口断路器起均匀断口电压分布，在单断口中电容器可以降低瞬态恢复电压起始部分的上升率，从而减小出现热重燃的可能性。高压陶瓷电容器还广泛用作高压开关的电压显示器。

除了钛酸钡基高压陶瓷电容器外，近年来发展了改性钛酸锶铋的高压陶瓷电容器，其特点是介质损耗因数低，介电常数和介质损耗因数随场强变化小，耐电强度高，老化稳定性好，表 1.8-62 和表 1.8-63 示出国产高压陶瓷电容器规格与性能。使用高压陶瓷电容器应注意：

（1）本产品的封装形式一般采用环氧树脂浇注。当使用或测试电压超过电容的外闪电压时，应将电容置于良好的液态或软性绝缘介质中（如硅油，硅橡胶）。

（2）外封装为环氧树脂的陶瓷电容器，如果直接二次封装于环氧或 SMC 中，可能会导致耐压性能的严重下降，此情况应在订货时做特殊要求。

（3）陶瓷电容受撞击时，内部陶瓷基体容易受到损伤，引起电性能严重下降。因此在运输及安装过程中应该轻拿轻放，避免冲击，使用时也不应对电容端子进行机械加工和焊接。

（4）电容器应在干燥、常温的环境中保存。长期放置不用的电容器，装配前应进行 80℃，3h 烘干处理，以避免受潮引起的耐电性能下降。

表 1.8-62 CT8-B 系列氧化锌避雷器用均匀电容

型号	耐压	电容量（pF）	串接电容数	L（mm）	D（mm）	H（mm）
CTZA	30kV DC	300	12	71	9.9	14
CTZB	20kV DC	350	12	53	8.6	13

表 1.8-63 CT8-D 系列 SF_6 断路器用高压陶瓷电容器

项 目	主要技术指标			
	CT8-B-1	CT8-B-2	CT8-B-3	CT8-B-4
静电容量(5V,1kHz)	500pF	150pF	350pF	500pF
静电容量(额定电压下)	700pF	150pF	350pF	500pF
温度特征	B	B	B	B

续表

项 目	主要技术指标			
	CT8-B-1	CT8-B-2	CT8-B-3	CT8-B-4
额定电压	3.5kVAC	5kVAC	4kVAC	3.7kVAC
耐压实验	15 kVAC /1min	20 kVAC /1min	17 kVAC /1min	16 kVAC /1min
局部放电起始电压	>7.5kVAC	>9kVAC	>8kVAC	>6.5kVAC
绝缘电阻	$\geqslant 1.5\times 10^{11}\Omega$	$\geqslant 1.5\times 10^{11}\Omega$	$\geqslant 1.5\times 10^{11}\Omega$	$\geqslant 1.5\times 10^{11}\Omega$
介质损耗因数（额定电压下）	≤0.07	≤0.005	≤0.005	≤0.005
额定冲击(耐受压 1.2/50μs，正负极性各 3 次)	30kV	40kV	35kV	32kV

2.7.7 独石结构的介质陶瓷

独石结构陶瓷电容器是为适应电子信息技术的集成化、微型化和智能化发展的趋势而发展起来的几何尺寸小、性能高、寿命长、便于安装的一种陶瓷电容器。它是由涂有金属浆料的陶瓷片，多层交替叠合使陶瓷材料与电极同时烧成一个整体，形成由多个陶瓷电容器相并联结构的电容器，如图 1.8-10 所示。

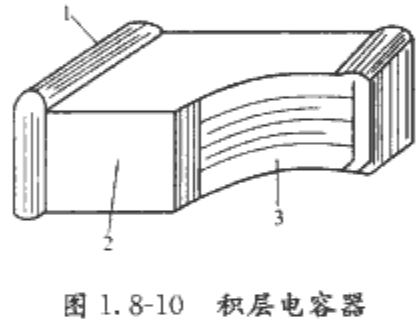


图 1.8-10 积层电容器
1—外部电极；2—陶瓷；
3—内部对向电极

独石结构陶瓷电容器采用薄片叠层结构，所以陶瓷介质可以做得很薄，这种多层陶瓷电容器介质厚度已由过去几十微米降至 10μm 以下，甚至达到 1～3μm。叠层数达 500 甚至 1000 层。多层陶瓷电容器的外型尺寸已小至 0.6mm×0.3mm×0.3mm，最大容量已达 100μF，已部分代替电解电容器。

上述高频陶瓷电容器与低频陶瓷电容器均可做成多层陶瓷电容器。在电子线路中应用极为广泛。电子元器件无引线化称为电子元件片式化。陶瓷电容器、电阻器、电感器、压电变压器、传感器等许多元件都做成了片式元件。通过表面组装技术，直接焊接在集成电路板上。20 世纪 80 年代初，电子元件片式化率占 4%～6%，至 90 年代初则达 50%，发展极为迅速。

参 考 文 献

[1] 李耀星．中国绝缘材料产品及应用手册．北京：机械工业出版社，2006.

[2] 罗传勇．电气绝缘材料国家标准及行业标准目录．桂林：全国绝缘材料标准化技术委员会秘书处，2007.

[3] 中国电器工业协会编写组．中国电器工业标准汇编：绝缘材料卷．北京：机械工业北京电工技术经济研究所，2003.

第2篇 磁性材料

主编单位： 钢铁研究总院
桂林电器科学研究所

主　　编： 李　卫　赵红一

编审人员： 林安利　贺　建　（中国计量科学研究院）
赵　宇　李　军　陈文智　陈国钧　孙　颖
（安泰科技股份有限公司）
阎阿儒　林　旻
（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）
吕宝顺　尹有祥　（北京矿业研究总院）
郭永权　冯维存　王会杰　刘　涛
（钢铁研究总院）
王学林　（桂林电器科学研究所）

第1章 概 述

1 磁性材料的分类和特点

磁性是物质的基本属性之一。在外加磁场作用下，各种物质都表现出不同的磁学性质，按照物质在外磁场中的不同表现，可以将物质的磁性分为抗磁性、顺磁性、铁磁性、反铁磁性、亚铁磁性和螺旋磁性以及散磁性，其中铁磁性、反铁磁性、亚铁磁性和螺旋磁性为常见的四种铁磁有序。按照磁性的强弱来划分，铁磁性和亚铁磁性同属于强磁性，其他几种为弱磁性，工程上较常用的磁性材料属于强磁性物质。

磁性材料的范畴比较广泛，确切来讲，一切具有可利用磁学性质的材料都可以称为磁性材料。通常所指的磁性材料，按照其功能一般分为如下几大类：

(1) 具有良好软磁特性的磁芯材料。

(2) 产生持续磁场的永磁材料。

(3) 通过外部磁场写入或读出、进行信息记录的磁记录材料。

(4) 通过光（或热）使磁化发生变化进行记录与再生的光磁记录材料。

(5) 在磁场作用下电阻发生变化的磁电阻材料。

(6) 因磁化使尺寸发生变化的磁致伸缩材料。

(7) 形状可以自由变化的磁性流体。

磁性材料被广泛开发应用于各种变压器、电动机、扬声器、记录介质、传感器、磁场发生器、电磁波吸收、计算机、办公自动化、现代通信等领域。随着近些年科学技术的发展，磁性材料在非晶态、稀土永磁化合物、超磁致伸缩、巨磁电阻等新材料方面取得了快速的发展。目前磁性材料已经成为支持并促进社会发展的关键材料之一。

软磁材料的磁性特征主要是易磁化、剩磁高、导磁性好、矫顽力低。软磁材料主要有电工用纯铁、硅钢片、铁镍合金、铁铝合金、软磁铁氧体、铁钴合金等，主要应用于能量传递和转换器件的关键部位。

永磁材料的磁性特征主要是矫顽力高、不易磁化、磁化后不易丧失磁性。永磁材料主要有铝镍钴、永磁铁氧体、稀土钴、稀土铁永磁材料等，主要应用于能够产生恒定磁场的磁路中，在一定空间内提供稳定的磁场。

磁记录材料主要用于记录、存储和再生信息元件。其中某些品种具有软磁特征、某些具有硬磁特征，一般对于磁记录材料的要求是应具有足够高的容量密度，以便提高记录密度，提高读出写入的效率。

磁光存储材料主要采用热磁技术，写入过程同时施加热能和磁场以便于材料的磁化，而在读出过程中利用磁光材料的 Kerr 效应将信号重现，其特点是磁光材料受聚焦激光照射时，高矫顽力急剧减弱，磁晶各向异性足够大可获得矩形的磁滞回线，良好的化学稳定性以及高效低廉的生产成本。已经开发出来的磁光存储材料的主要成分可以分为金属类和氧化物类，从结构上可分为晶态和非晶态类。

磁电阻材料是利用铁磁性金属的电输运性质在外加磁场的作用下发生改变这一特性而开发的应用于磁存储、传感器等领域的一类磁电子材料，其中以巨磁电阻（GMR）材料和庞磁电阻（CMR）材料的研究进展最为引人瞩目。GMR 材料主要是由铁磁性金属和导电性金属多层膜构成，而 CMR 材料的主要成分为钙钛矿型锰氧化物。

磁致伸缩材料是利用磁性材料在外场中的尺寸和形状变化研制成的一类磁功能材料，其本质是通过磁致伸缩将磁能（电能）和机械能进行互相转换，这种能量转换器件用途较多，磁致伸缩振子是最早的应用之一，已经开发出来的磁致伸缩材料主要是以金属系、铁氧体系为主。

磁流体材料主要是指用表面活性剂处理过的超细磁性微粒高度分散于基液（载液）中形成的一种磁性胶体溶液。这种溶液在重力和磁力作用下不会出现凝聚和沉淀现象，它既具有固体的磁性，又具有液体的流动性，因此可以用来制作磁液密封、磁液阻尼、磁液悬浮等磁液器件。从磁流体的主要构成来分，主要有铁氧体型磁性液体和金属型磁性液体两大类，其应用前景广泛。

根据磁性材料的不同特征，磁性材料的分类具有多种不同的划分方法。因此在使用磁性材料时一定要注意区分其类别，以便更好的利用其磁性特征。

2 磁性材料的磁学基础

2.1 磁学基本量及其单位制

2.1.1 磁学基本量

人类对磁性现象的认识可以追溯到遥远的古代，早在中国春秋时代的《管子》一书中就有关于磁石的记载，而国外关于磁性的记载也可以追溯到公元前 6 世纪希腊人 Thales 的著作。伴随着人类文明的进步，人们对磁性现象的认识和理解也在不断深入，而将磁性材料作为一门科学进行系统的研究和开发则始于 20 世纪初。100 多年来，人类在这方面取得了长足进步，但由于人们在开始认识和研究磁性现象时所持的角度和方法的不同，形成了描述磁性现象的不同的观点。从对磁性现象的基本描述来看，主要存在如下一些磁学基本物理量。

2.1.1.1 磁极

自由悬挂的磁针受到地磁场的作用，将指示南北，说明磁针具有两个磁极，即 N、S 极。两个磁体的同级相斥，异极相吸。与静电库伦定律相似，两个磁极间的磁作用力大小与两个磁极的强度成正比，与其间距的平方成反比，并作用在二者的连线上，即

$$F = km_1m_2/r^2r_0 \tag{2.1-1}$$

式中：r_0 是 r 的矢量单位（由 N 极指向 S 极）；常数 $k=1/4\pi\mu_0$；$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m，称为真空磁导率；m_1 和 m_2 分别为两个磁极的强度，其单位为 Wb。

2.1.1.2 磁矩 M_m

一根长度为 l、磁极强度为 m 的棒状磁铁，其磁矩定义为 $M_m=ml$，其方向为从 S 极指向 N 极，单位是 Wb·m，也称为磁偶极矩。另外，从电流和磁场关系角度也可以定义

为 $M_m=iS$，式中 i 为电流强度，S 是沿电流回路包围的面积，其单位为 A·m²，与 ml 具有等价的量纲。

2.1.1.3 磁场强度 H、磁化强度 M、磁感应强度 B 以及磁极化强度 J

磁场可以由永久磁体产生也可以由电流产生。一个每米 N 匝线圈，通以 i 电流的无限长螺线管轴线中央的磁场强度为 $H=Ni$，单位为 A/m；一个永久磁体在距离 r 处产生的磁场可以用单位磁极强度在该处所受的力来定义 $H=F/m_1=(km_1/r^2)\cdot r_0$，若 m_1 为 N 极，则 F 与 H 方向相同，反之，则相反。

磁化强度 M 是指宏观磁体单位体积内在某一方向的磁矩，一般来讲，宏观物体的磁化强度起源于组成物体的原子固有磁矩。如果一个原子的磁矩可以标记为 $\mu_{原子}$，那么 $M=V^{-1}\sum_{i=1}^{n}\mu_{原子}$，其单位为 A/m，式中 V 为磁体体积。

任何物质在外磁场作用下，除了外磁场 H 外，还要产生一个附加的磁场。物质内部的外磁场和附加磁场的总和称为磁感应强度 B，其表达式为 $B=\mu_0(H+M)$，在物质外部 $B=\mu_0 H$，其单位为 Wb·m²，1 Wb·m²=1T。其中，令 $\mu_0 M=J$，J 则称为磁极化强度，也称内禀磁感应强度。

2.1.1.4 磁化率和磁导率

为研究磁性物质的磁化特征，通常将磁化强度 M 与外磁场的关系表示为 $M=XH$，X 称为磁化率，而磁感应强度和外磁场的关系可以表示为 $B=\mu H$，μ 称为磁导率，其单位为 H/m，磁导率被真空磁导率除则得到相对磁导率 $\mu'=\mu/\mu_0$，X 和 μ' 均为无量纲物理量。

2.1.2 磁学单位制

在磁学中比较常用的主要有两种单位制：国际单位制（SI）和高斯单位制（CGS）。SI 单位制的基本单位是米、千克、秒、安培、开尔文、坎德拉和摩尔。CGS 单位制的基本单位为厘米、克和秒，它量度电学采用 CGSE 单位制（或 e.s.u.），量度磁学采用 CGSM 单位制（或 e.m.u.），因此，高斯单位制实际上是一种混合单位制，这种单位制在物理学中长期使用，影响很深。SI 单位制和 CGS 单位制在磁学领域中应用时存在较为复杂的换算关系，这和早期不同学者对磁学原理问题的不同阐述有关。

在磁学中应用高斯单位制时，所有与真空磁场有关的公式都必须使用以奥斯特为单位的磁场强度 H，而不引入真空磁感应强度 B（以 Gs 为单位），尽管在这种单位制中真空磁导率 μ_0 为 1，H 和 B 在数值上相等。所有介质的磁感应强度 $B=H+4\pi I$，其中 I 为单位体积内的磁化强度，其单位为 Gs，与 SI 单位制中的 M 类似。

在磁学中应用国际单位制时，凡涉及力、力矩、能量等公式需要引入磁场时都应用磁感应强度 B。磁场强度仅出现在计算电流的磁效应或类似场合。当涉及 H 与其他物理量的相互作用时，不允许单独使用 H，而要使用 $\mu_0 H$。当 SI 单位制应用于磁化介质时，介质中的磁感应强度可以表达为 $B=\mu_0(H+M)$，$\mu_0 M=J$。

需要强调的是：在国际单位制中必须区分两种磁感应强度，即介质不存在时和介质存在时的磁感应强度的描述是不一样的。真空磁感应强度相当于磁场，可以表述为 B_0，其单位为 T，可以和高斯单位制中的 H 同义使用，而 H 在国际单位制中的单位为 A/m，虽然被冠以“磁场”使用，但它和高斯单位制中磁场 H 具有不同含义。表 2.1-1 列出了主要磁学量在两种单位制的换算关系。

表 2.1-1 主要磁学量在两种单位制的换算关系

磁学量	符号	SI		CGS		由 SI 单位换算成 CGS 单位时相乘因数
		单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
磁场强度	H	安培/米	A/m	奥斯特	Oe	$4\pi\times10^{-3}$
磁感应强度（磁通量密度）	B	特斯拉	T	高斯	Gs	10^4
磁化强度	M	安培/米	A/m	高斯	Gs	10^{-3}
磁极化强度	J	特斯拉	T	高斯	Gs	10^4
磁极强度	m	韦伯	Wb	电磁单位		$10^8/4\pi$
磁通量	Φ	韦伯	Wb	麦克斯韦	Mx	10^8
磁偶极矩	j_m	韦伯·米	Wb·m	电磁单位		$10^{10}/4\pi$
磁矩	μ	安培平方米	A·m²	电磁单位		10^3
磁化率（相对）	χ					$1/4\pi$
磁导率（相对）	μ					1
真空磁导率	μ_0	亨利/米	H/m			$10^7/4\pi$
磁动势	F_m	安培	A		Gb	$10/4\pi$
磁势	φ,ψ	安培	A		Gb	$10/4\pi$
退磁因子	N					4π
磁阻	R_m	安培/韦伯	A/Wb	电磁单位		$4\pi\times10^{-9}$
磁能量密度	F	焦耳/立方米	J/m³	尔格/立方厘米	erg/cm³	10
磁晶各向异性常数	K	焦耳/立方米	J/m³	尔格/立方厘米	erg/cm³	10
磁致伸缩常数	λ					1
旋磁比	γ	米/安培秒	m/(A·s)	1/奥秒	1/Oe·s	$10^3/4\pi$
磁能积	$(BH)_{max}$	特斯拉·安/米	T·A/m	高斯奥斯特	Gs·Oe	$4\pi\times10$
自感	L	亨利	H	厘米	cm	10^7

2.1.3 原子磁性

2.1.3.1 电子磁矩

一切宏观物质都是由原子组成，原子则由原子核及核外电子所组成。由于原子核及电子具有一定的磁矩，所以宏观物质严格来说都具属于磁性物质。但是电子和原子核相比，由于电子质量约为原子核质量的 1/1836.5，因此电子的磁矩要比原子核的磁矩大约三个数量级。因而宏观物质的磁性主要取决于电子的磁矩大小。根据量子力学的研究结果，电子的磁矩又可以分为轨道磁矩和本征磁矩（又叫自旋磁矩）。

电子的轨道磁矩是由于电子环绕原子核做轨道运动所产生的，其绝对值大小可以根据量子力学的计算结果得到，即 $\mu_l=\sqrt{l(l+1)}\mu_B$，其在空间任意方向的投影为 $\mu_l^z=m_l\mu_B$，

其中，$l=0$，1，2，3，…称为轨道角量子数，$m_l=0$，±1，±2，±3，…称为磁量子数，μ_B 为玻尔磁子，其大小为 $9.274\times10^{-24}\,A\cdot m^2$（或 J/T）。

电子的自旋在实验上是在研究原子的光谱时提出来的，在理论上它完全属于量子力学效应，宏观物体中没有与之相对应的物理量。电子的自旋磁矩绝对值为 $\mu_s=\sqrt{s(s+1)}eh/2\pi m=\sqrt{3}\mu_B$，其在外磁场方向的投影为 $\mu_{sz}=2m_s\mu_B$，其中 $s=1/2$，为自旋量子数，h 为普朗克常数。

2.1.3.2　原子磁矩

原子磁矩主要是由电子的轨道磁矩和自旋磁矩共同决定的。当原子中包含多个电子时，各原子间将合成总的角动量，共同对原子磁矩大小作出贡献。一般来讲，各原子间的耦合主要存在两种方式：①不同电子间的轨道－轨道、自旋－自旋首先耦合，然后再进行轨道和自旋间的耦合，这类情况主要发生在原子序数较小的原子中，称为 L-S 耦合；②同一电子内的轨道－自旋首先耦合，然后再和其他电子的总角动量进行耦合，这类情况主要发生在原子序数较大的原子中，称为 J-J 耦合。对于 3d 过渡族元素和 4f 稀土元素来说，其基态或低激发态均属于 L-S 耦合，其原子磁矩可由下式得到 $\mu_J=g_J\sqrt{J(J+1)}\mu_B$，其中 $g_J=1+[J(J+1)+S(S+1)-L(L+1)]/[2J(J+1)]$，称为朗德因数或者光谱分裂因数，$J$ 为总角量子数，S 为总自旋量子数，L 为总轨道量子数。

根据光谱实验结果，洪德（hund）给出了著名的确定基态原子或离子的 J、S、L 的洪德法则，主要内容包括：

（1）在泡利原理许可的条件下，总自旋量子数 S 和总轨道量子数取最大值。

（2）当电子数未达到电子壳层总数的一半时，总角动量量子数 $J=L-S$。

（3）当电子数达到或超过电子壳层总数的一半时，$J=J+S$。

根据洪德法则可以计算基态原子或离子的磁矩，但需要指出的是，对于 3d 元素和 4f 元素，计算得到的孤立原子或离子的磁矩和实际晶体中的原子磁矩不完全一致，这主要是由于金属晶体中原子按点阵有规则排列，点阵节点上的离子处于周围近邻离子产生的晶场中，晶场对未满壳层电子磁矩的影响使得理论计算数值与金属晶体的实验数值存在差异，一般来说，3d 元素的计算磁矩要比实验值大许多，而 4f 元素则接近完全一致。

2.1.4　物质的宏观磁性

物质放入磁场中表现出不同的磁学特性，这称为物质的磁性。就目前已知的宏观物体的磁性类型而言，根据其磁化率 χ 的不同，可以分为以下 5 大类。

2.1.4.1　抗磁性物质

严格来说所有物质都有抗磁性。这类物质呈现的主要特征为 $\chi<0$，且 χ 不随温度的变化而变化，一般来说 $|\chi|$ 约为 $10^{-7}\sim10^{-6}$。它在外磁场中产生的磁化强度和磁场相反。典型代表物质有惰性气体、Bi、Zn、Ag、Mg、Si、P、S 等部分金属、非金属。

2.1.4.2　顺磁性物质

这类物质的主要特点是 $\chi>0$，且随温度升高而下降，$|\chi|$ 数值约为 $10^{-6}\sim10^{-5}$，部分典型代表物质有 Sc、Ti、Ba、Cr 铁族元素，La、Ce、Pr、Nd、Sm 等稀土元素，一些碱金属 Li、Na、K 等都属于顺磁性物质。

2.1.4.3　铁磁性物质

这类物质的主要特点是 $\chi>0$，其数值一般为 $10^{-1}\sim10^{5}$，χ 不但和温度、磁场有关，还和磁化历史有关。铁磁性物质的一个重要特征就是存在磁性变化的临界温度（居里温度），当温度高于居里温度时，呈顺磁性，当温度低于居里温度时，呈现铁磁性。金属 Fe、Co、Ni 以及其他元素的合金 Fe-Si、CrO_2 等都属于铁磁性物质。

2.1.4.4　反铁磁性物质

这类物质的主要特点是 $\chi>0$，其数值一般为 $10^{-5}\sim10^{-3}$，类似于顺磁性物质，与其最主要的区别在于在 χ-T 关系曲线上 χ 出现极大值。极大值所对应的临界温度为奈尔温度，当温度低于奈尔温度时，物质呈现出反铁磁性的磁有序结构，高于奈尔温度时，呈现出顺磁性。一些典型的过渡金属的氧化物、卤化物和硫化物如 MnO、FeO、NiO、CoO、MnF_2、$FeCl_2$、MnS 等属于反铁磁性物质。

2.1.4.5　亚铁磁性物质

此类物质在宏观上类似于铁磁性物质，$\chi>0$，其数值范围为 $10^{-1}\sim10^{4}$，并且 χ 是温度和外磁场的函数，与磁化历史有关。亚铁磁性物质存在临界温度（居里温度），当温度小于居里温度时，物质呈现亚铁磁性，温度高于居里温度时，呈现出顺磁性。常见的亚铁磁性物质有尖晶石型铁氧体、磁铅石型铁氧体、石榴石型铁氧体和钙钛矿铁氧体等。

此外，随着科学研究的不断深入，在稀土元素的合金物质中又相继发现了原子磁矩的螺旋型的非共线排列，在稀土过渡族非晶态合金中发现了散磁性磁结构，其磁特征有待进一步研究。

2.2　磁滞回线

磁性材料的磁化现象随磁场变化的方式比较复杂，最直观的描述磁性材料磁化特征的方式是磁滞回线。如图 2.1-1 所示。当外磁场达到 H_1 时，磁性材料达到磁化状态 a，磁感应强度数值为 B_1，如果此时减小磁场，磁感应强度不是沿着 aO 曲线下降，而是沿另一曲线 ab 下降，显然，B 的变化滞后于 H 的变化，这个现象称为磁滞，由磁滞引起的损耗称为磁滞损耗。如果外场由 $H_1\to O\to -H_1\to O\to H_1$ 缓慢变化一周，$B-H$ 变化曲线将呈现一闭合曲线 abcdef，称为磁滞回线。在磁化曲线 oa 上任意一点所对应的磁场强度变化一周，都可以得到相应的磁滞回线。随着磁场强度的增加，磁滞回线的面积也随着增加。当磁化到饱和的状态时，再增大磁场，磁滞回线的面积基本保持不变，这时的磁滞回线称为极限磁滞回线，如图所示的 ABCDEF 回线。由极限磁滞回线看出，当 H 降低到零时，磁感应强度并不回到零，而是下降到 B 点，这时对应的磁感应强度为 B_r，称为剩磁。当 $H=0$ 时，实际上 $B_r=\mu_0 M_r$，若要将 B_r 降低为零，必须加一反向磁场，这个反向磁场的绝对值称为矫顽力 $_BH_c$。同样，要将剩余磁感应强度 B_r 对应的 M_r 降为零，所需要的外场的绝对值称为内禀矫顽力 $_MH_c$，数值上说 $_MH_c$ 总是要大于 $_BH_c$，材料的矫顽力愈高，两者间的差距就越大。剩磁与饱和磁感应强度的比值称为剩磁

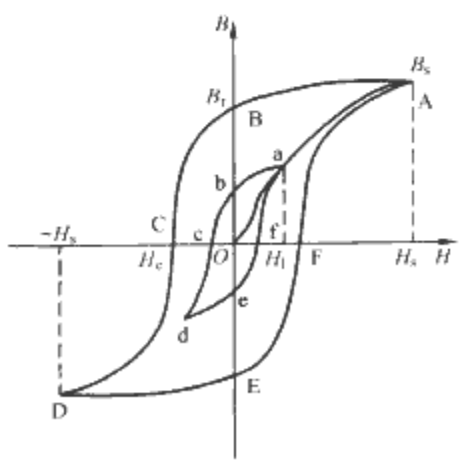


图 2.1-1　磁滞回线

比，即 B_r/B_s，它用来表征磁滞回线接近矩形的程度。

2.3 磁畴和相互作用能

2.3.1 磁畴

理论和实验证明，在没有外磁场作用下，磁性材料内部原子磁矩已经在一个小的区域内按某一方向平行排列起来，形成一个合磁矩，这样的一个自发磁化形成的区域称为磁畴，参见图 2.1-2。根据铁磁性理论，各种磁畴的形成是原子或离子间交换作用的结果，这是所有强磁性物质独有的特性。

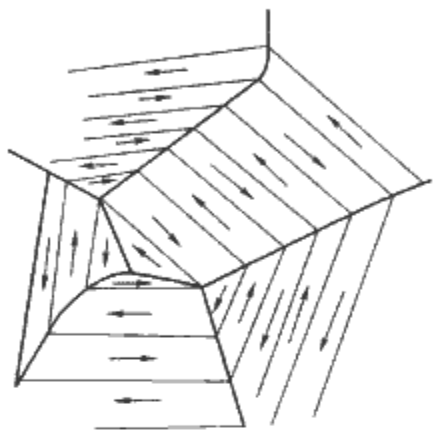


图 2.1-2 磁畴示意图

磁性材料由大量磁畴组成，磁畴的形状和在外场中的表现形式各不一样，磁畴在外磁场中的变化过程就是把已经自发磁化形成的磁矩从各个不同方向改变到最接近外磁场方向的过程，磁学上称之为技术磁化，它一般是通过磁畴的畴壁移动和磁矩转动来完成的。

2.3.2 磁性材料中的相互作用能

磁性材料在外磁场作用下，各磁畴与外磁场、磁畴之间将产生相互作用，一般来讲，永磁材料中主要存在以下几种相互作用。

2.3.2.1 静磁能

磁性物质在外磁场中，外磁场与磁体的总磁矩间的相互作用称为静磁能。假设磁体具有磁极化强度 J，它与外场的夹角为 θ，那么静磁能 E_H 可以表述为：

$$E_H = -JH\cos\theta = -\mu_0 MH\cos\theta \qquad (2.1\text{-}2)$$

如果没有阻力，J 就会变到磁场方向来，这时 θ 为 0，静磁能最低。

2.3.2.2 磁晶各向异性能

磁性材料一般都是由具有不同晶格结构的化合物组成，因此，受其晶体结构的影响，材料的磁化过程沿不同取向方向呈现不同的规律。这造成了不同取向上的能量差异，称为磁晶各向异性能。

磁晶各向异性能顾名思义与材料的晶格结构有关，因此不同的晶体结构对应不同的能量表达式。简单来说，立方晶体的磁晶各向异性能 E_k 可以表示为：

$$E_k = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) + \cdots \qquad (2.1\text{-}3)$$

单轴各向异性晶体的磁晶各向异性可以表达为：

$$E_k = K_0 + K_1\sin^2\theta + K_2\sin^4\theta + K_3\sin^6\theta + \cdots \qquad (2.1\text{-}4)$$

2.3.2.3 退磁场能

磁性材料经外磁场磁化后，材料内部将产生一种与外磁场方向相反的或接近相反的磁场，因为其有减退磁化的作用，所以称之为退磁场，退磁场与磁化强度的大小成正比，即 $H_d = -NM$，其中 N 为退磁因子，它由材料的几何形状所决定。球状铁磁体的退磁因子可以表述为 $N_x + N_y + N_z = 1$，且 $N_x = N_y = N_z = 1/3$，有限长的长旋转椭球体沿长轴 l 方向的退磁因子为：

$$N_l = \frac{1}{k^2-1}\left[\frac{k}{\sqrt{k^2-1}}\ln(k+\sqrt{k^2-1}) - 1\right] \qquad (2.1\text{-}5)$$

$$N_l + 2N_d = 1 \qquad (2.1\text{-}6)$$

式中：$k = l/d$，为尺寸因子；d 为短轴方向的半径；N_d 为短轴方向的退磁因子。

当有退磁场存在时，磁性体积单位的退磁能为

$$E_D = \frac{1}{2}\mu_0 NM^2 \qquad (2.1\text{-}7)$$

如果磁性材料内部存在空隙或者包含夹杂物，磁化后这些地方会出现磁极从而产生退磁场，从而影响材料的磁导率，因此在永磁材料的制造方面，应尽量避免非磁性物质产生的退磁影响，提高材料的均匀度。

2.3.2.4 磁弹性能

磁性材料在磁场中磁化时，铁磁体的尺寸和体积发生变化的现象称为磁致伸缩，如果材料受到限制而不能发生自由伸缩，就将产生应力效应，改变材料的磁化状态。铁磁体的内应力和外应力都可产生磁致伸缩，这种现象来源于磁性和弹性间的耦合，与此有关的能量称为磁弹性能 E_σ，通常采用 $\lambda = \mathrm{d}l/l$ 来表示磁性材料的磁致伸缩程度，称为磁致伸缩系数，当外场增大到一定程度时，其数值达到最大，称为饱和磁致伸缩系数，用 λ_s 来表示。

对于 λ 为各向同性的磁体，当应力 σ 与磁化强度矢量之间的夹角为 θ 时，磁弹性能可以描述为：

$$E_\sigma = \frac{3}{2}\lambda_s\sigma\sin^2\theta \qquad (2.1\text{-}8)$$

由此可以看出，磁弹性能随角度 θ 变化，当 λ 与 σ 符号相同，并且 $\theta = 0$ 时，磁弹性能最小；应力的方向为易磁化方向；$\theta = 90°$ 时，磁弹性能最大，垂直应力方向为难磁化方向。

2.4 技术磁化

前面已经提到，磁性材料最典型的磁性特征是磁滞现象，一般采用磁滞回线来描述，但磁性材料从退磁状态到磁化饱和这一过程通常用磁化曲线来描述，如图 2.1-3 所示。

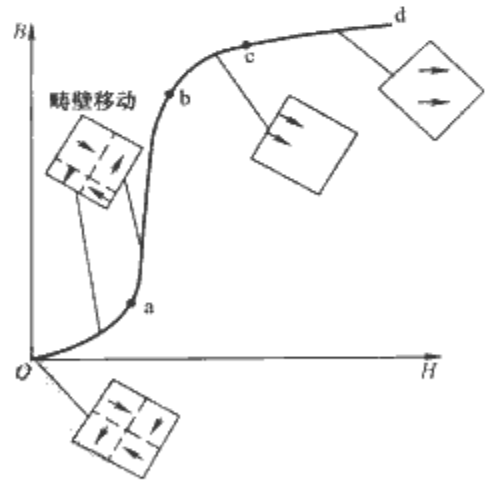


图 2.1-3 磁性材料典型的磁化曲线

一般来讲，磁化曲线可以分为四个阶段，每个阶段的磁化过程是不相同的，在图 2.1-3 所示的磁化曲线的 0a 阶段，磁畴磁矩的转动很小，磁化过程主要是由于磁畴畴壁的可逆位移引起，因此其过程可逆，阻碍畴壁移动的主要是磁晶各向异性能和磁弹性能。这时的磁化率和磁导率一般称为起始磁化率和起始磁导率。在图中的ab阶段，磁感应强度随磁

场的强度增加而迅速增加，这时对应的磁化率和磁导率为最大，磁化过程主要是由不可逆畴壁位移所驱动，因此磁化过程不可逆。在图中的 bc 阶段，磁畴磁矩转动起主要作用，这阻止磁畴磁矩转动的主要是磁晶各向异性能和退磁场能，因此这两种能量的大小直接影响了材料的矫顽力。在图中的 cd 阶段，磁化过程趋近饱和，这时磁畴的磁矩已经转到外磁场方向或接近外磁场方向。

另外，沿着磁滞回线的正向饱和点对材料进行反向磁化，在第二象限形成的曲线用来描述材料的反磁化过程。反磁化过程给出了磁性材料的几个重要参数，剩磁、矫顽力和磁能积。因此，实际生产中一般采用测量第二象限退磁曲线的方式来判定以上参数。

2.5　磁性材料技术磁性参量

描述磁性材料磁性特征的磁性参量可以分为内禀磁参量和宏观磁性参量。一般来说，饱和磁化强度 M_s、居里温度 T_c、各向异性场 H_A 等不取决于材料的结构，而是取决于材料的化学成分、晶体结构、温度等，也称结构不敏感参量；而剩磁 M_r 和 B_r、矫顽力 H_c、磁能积（BH）等除了取决于内禀磁性参量外，还取决于材料的晶粒大小、均匀度、晶粒取向、晶体缺陷、掺杂物、工艺条件等，也称结构敏感参量。

2.5.1　饱和磁化强度 M_s

饱和磁化强度，也称为自发磁化强度，是衡量永磁材料磁性特征的一个极其重要的内禀物理量。它一般取决于组成材料的磁性原子数、原子磁矩、温度和原子间的排列结构。在低温区，它一般遵循布洛赫（Bloch）定律

$$M_s(T) = M_s(o)\left[1 - 0.118\alpha\left(\frac{T}{T_c}\right)^{3/2}\right] \tag{2.1-9}$$

对于简立方、体心立方和面心立方的 α 值分别为 2、1 和 1/2。当 $T \to 0$K 时，$M_s(T) \to M_s(0)$，$M_s(0)$ 是绝对饱和磁化强度。在室温 293K 时，M_s 可以表示为：

$$M_s = n_{eff} \cdot (\text{单位体积磁性原子数}) \cdot \mu_B = n_{eff}\frac{Nd}{A}\mu_B \tag{2.1-10}$$

式中：N 为 1mol 的磁性原子数；d 为材料的密度；A 为相对原子质量；μ_B 为玻尔磁子；n_{eff} 为有效玻尔磁子数；对于 3d 金属与合金，n_{eff} 近似等于 $g_j S$，对于 4f 金属与合金，n_{eff} 近似等于 $g_j J$。

实验中一般可以采用穆斯堡尔谱等方法来测定稀土永磁化合物的原子磁矩，从而测定化合物的饱和磁化强度。

2.5.2　各向异性场 H_A

磁晶各向异性用来描述磁性材料内能对自发磁化强度方向的依赖关系，它通常与组成材料晶体结构的对称性有关。由于沿晶体各个方向进行饱和磁化所需要的外磁场大小不同，所以材料呈现磁晶各向异性，对于单晶体来讲，存在难磁化方向和易磁化方向，在无外场时，磁矩倾向于沿易磁化方向取向，这好像在易磁化方向存在一个磁场，把磁矩拉过去一样，这个起因于磁晶各向异性的虚拟磁场称为磁晶各向异性场。对于宏观材料来讲，一般沿难磁化方向磁化与沿易磁化方向磁化的磁化曲线的交点对应的磁场即为磁晶各向异性场 H_A，对于单轴各向异性晶体来讲，其各向异性场为 $H_A = \frac{2K_u}{J_s}$，对于立方晶系其各向异性场为 $H_A = \frac{2K_1}{J_s}$（$K_1 > 0$）；$H_A = \frac{4|K_1|}{3J_s}$（$K_1 < 0$）。实验上可以采用转矩磁强计法来精确测定磁各向异性，而实验上对材料的各向异性测定一般采用磁化曲线交点法和奇点探测法。

2.5.3　居里温度 T_c

居里温度 T_c 是磁性材料的一个重要参数，一般来讲，T_c 越高，它所对应的材料的使用温度范围越大，材料的温度稳定性也会越高，磁性材料研发的一个重要方向就是提高 T_c 的数值。根据分子场理论可以确定材料的居里温度：

$$T_c = Ng_J^2\mu_B^2 J(J+1)\lambda/3k \tag{2.1-11}$$

式中：N 为单位体积的磁性原子数；g_J 为 Lande 因子；J 为原子的角动量量子数；λ 为分子场系数；k 为玻尔兹曼常数，其中 λ 与交换积分常数成正比，合金系的 T_c 与 N、J、λ 有关。

实验中一般采用测量 M—T 曲线的方式获得 T_c，当 $M \to 0$ 时对应的温度为材料的居里温度；或者采用测量交流磁化率与温度关系变化曲线的方式，交流磁化率峰值所对应的温度即为居里温度。

2.5.4　剩磁 B_r 和 M_r

前面已经提过，磁性材料饱和磁化、撤掉外磁场后，在磁化方向上保留的 B_r 或 M_r，简称剩磁，前者为剩余磁感应强度，后者为剩余磁化强度。对于单晶各向异性无织构的多晶体材料来讲，技术磁化饱和后每个晶粒的磁化矢量都将大体上转向外磁场方向；去掉外磁场后，各晶体的磁化矢量都转动到靠近反磁化方向的易磁化方向。因此多晶体的剩余磁化强度为：$M_r = \frac{1}{V}\sum_1^n M_s V_i \cos\theta_i$，式中 V_i 代表第 i 个晶粒的体积，θ_i 代表第 i 个晶粒的 M_s 方向与外磁场的夹角，V 为样品的总体积。如果是单晶，则简化为 $M_r = M_s\cos\theta$，当沿单晶体易磁化方向磁化时，$M_r = M_s$，$B_r = \mu_0 M_r = \mu_0 M_s$，$B_r$ 的极限值为 $\mu_0 M_s$。对于单轴各向异性无织构多晶体，在一微小单元的球心立体角 $d\Omega$ 的磁化强度为 $dM_r = \frac{d\Omega}{2\pi}M_s\cos\theta$，积分后可以得到 $M_r = M_s/2$。

实际宏观材料的剩磁的计算要复杂的多，对粉末冶金工艺制得的磁性材料来说，可以采用下式来大致计算其剩磁：

$$M_r = A(1-\beta)\frac{d}{d_0}\overline{\cos\theta}M_s \tag{2.1-12}$$

式中：A 为正向磁畴的体积分数；β 为非磁性相的体积分数；$\overline{\cos\theta}$ 为粉末颗粒的取向因子；d/d_0 为粉末合金的相对密度。

2.5.5　矫顽力 H_c

前面已经提到，磁性材料饱和磁化后，将其磁化强度或磁感应强度降低到零所需要的反向磁场的大小称之为矫顽力，分别记为 H_{cM} 和 H_{cB}，前者称为内禀矫顽力，后者称为磁感矫顽力。其大小与反磁化过程的难易程度有关，一般认为，磁体的反磁化过程与技术磁化一样也包括畴壁位移和磁矩转动两个基本方式。不同材料具有不同的微观结构和内禀性能，因此其矫顽力表达式也存在很大差异，早期的磁性材料其矫顽力机理主要有内应力理论、掺杂理论、磁晶各向异性理论、形状各向异性理论、单畴颗粒理论。随着永磁材料的发展，结合稀土永磁等新型永磁材料本身的特点又逐渐形成了形核理论、钉扎理论、热激活理论、发动场理论等。本章第 3 节将详细介绍永磁材料的矫顽力机理。

2.5.6　最大磁能积 $(BH)_m$

磁性材料用作磁力源或磁场源，主要是利用其在空隙中产生的磁场，而磁体在空隙中产生的磁场主要取决于磁体内部的 B 和 H 的乘积，称为磁能积，一般来说，永磁材料磁

能积越高，其单位体积产生的能量越大。

永磁材料的磁能积可以通过第二象限的退磁曲线获得，退磁曲线上的任意一点都对应 B 和 H 的乘积，它代表磁体单位体积所具有的能量，在极限磁滞回线的第二象限曲线上总能找到一点，其对应的 B 和 H 的数值最大，称为最大磁能积 $(BH)_m$，最大磁能积可以通过等磁能曲线获得。如图 2.1-4 所示。图 2.1-4 中 g_1、g_2、g_3 称为等磁能曲线，它是以不同的 B、H 作为坐标原点，将 B、H 乘积相等的各点连成的，其中总有一条等磁能曲线与退磁曲线相切，切点即为最大磁能积点，如图 2.1-4 中 d（B_d、H_d）点。在设计磁路时，应尽可能将磁性材料的工作点与最大磁能积点接近。

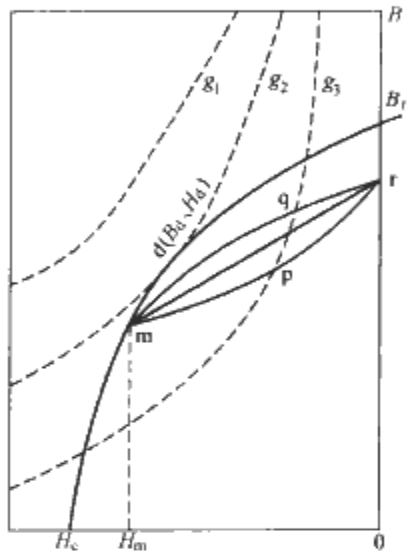


图 2.1-4 永磁材料的特性曲线

理论上来讲，理想的永磁材料应该满足 $Br=\mu_0 M_s$，$H_{cB}=M_s$；$M_r=M_s$，$H_{cM}\geqslant M_s$，即内禀退磁曲线为矩形，磁感退磁曲线为直线，如图 2.1-5 所示。利用最大磁能积点处 $\frac{d(BH)}{dB}=0$ 的条件以及 B 的表达式 $B=\mu_0(H+M)$，可以得到最大磁能积处的 H 和 B 的数值分别为：

$$H=M_s/2, B=\mu_0 M_s/2 \qquad (2.1\text{-}13)$$

最大磁能积的理论极限值为 $(BH)_m=\mu_0 M_s^2/4$。而实际上由于材料和工艺、成分等因素密切相关，永磁材料的最大磁能积一般远小于理论值。

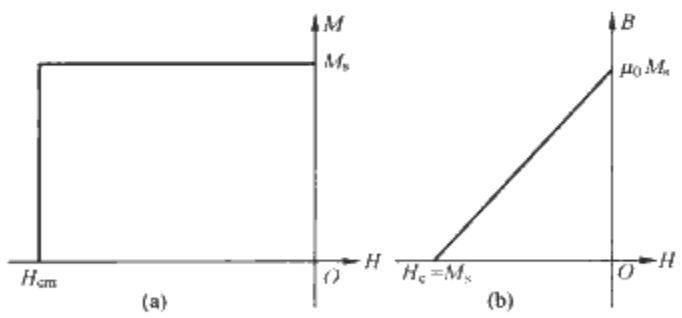


图 2.1-5 理想的退磁曲线

（a）理想的内禀退磁曲线；（b）理想的磁感退磁曲线

3 磁性材料的矫顽力机理简介

磁性与非磁性材料的主要区别是它们在外磁场变化过程中是否存在磁滞现象，而表征磁滞现象的一个重要物理量是材料的矫顽力，研究材料的矫顽力有利于认清材料的磁学特性，从而改进磁性材料的磁特性。材料的矫顽力问题主要是机制机理问题，它反映了反磁化过程中磁畴的位移、体积、磁矩等的变化。从根源上来讲，矫顽力的形成主要来源于畴壁位移和磁畴磁矩转动，但是由于材料本身成分、微观结构的千差万别，影响畴壁移动和磁矩转动的原因非常复杂，因而形成了对矫顽力机制的不同认识。主要存在如下几个方面。

3.1 畴壁位移过程中的应力和掺杂理论

磁性材料在磁化过程中，沿外磁场方向形成了正向磁畴，当外场逐渐取消，直至反向增加时，材料内部的反向磁畴将发生若干次跳跃（在磁学上称之为巴克豪森跳跃）而长大，当正反向磁畴体积相等时磁化强度将为 0，这时所对应的反向磁场就是矫顽力，对于单晶体畴壁位移来讲，存在下式：

$$H_{ci}=\frac{1}{2\mu_0 M_s\cos\theta}\left(\frac{\partial\gamma}{\partial x}\right)_{max} \qquad (2.1\text{-}14)$$

式中：θ 为反向磁畴磁矩与反向磁化方向的夹角；γ 为畴壁能。

对于内应力和掺杂所形成的畴壁能来讲，其表述方式不一样，因此其矫顽力的表达式也不一样，而对于实际磁性材料来讲，畴壁能的大小及其梯度变化包含多种因素，在同一材料内部可能既包含应力因素也包含掺杂因素，还有其他缺陷、数量与分布等原因。下面分别列出了内应力和掺杂理论的矫顽力表达式：

应力理论：
$$H_{ci}=\frac{\pi\lambda_s\sigma}{\mu_0 M_s}\frac{L}{\delta}(L\ll\delta)$$
$$H_{ci}=\frac{\pi\lambda_s\sigma}{\mu_0 M_s}\frac{\delta}{L}(L\gg\delta) \qquad (2.1\text{-}15)$$

掺杂理论：
$$H_{ci}=\frac{K_1}{2\mu_0 M_s}\beta^{2/3}\frac{\delta}{R}(R>\delta)$$
$$H_{ci}=\frac{K_1}{2\mu_0 M_s}\beta^{2/3}\frac{R}{\delta}(R<\delta) \qquad (2.1\text{-}16)$$

式中：λ_s 为磁致伸缩系数；L 为应力波的波长；δ 为畴壁厚度；K 为磁晶各向异性常数；β 为掺杂物的体积分数；R 为掺杂物半径。当 L 与 R 分别与 δ 相当时，矫顽力存在最大值。

3.2 磁矩不可逆转动—高各向异性理论

在某些铁氧体材料、磁性薄膜材料、脱溶弥散型合金等材料中存在大量单畴颗粒，单畴颗粒与单畴颗粒之间被非磁性或弱磁性材料所隔开，畴与畴间不存在过渡层，因而没有畴壁。这时材料的磁化及反磁化过程只能通过磁矩的转动来完成，而决定和影响磁矩转动的因素主要有磁晶各向异性、应力各向异性、形状各向异性等。由此产生了不同的各向异性主导的矫顽力形式。根据不同的单畴颗粒模型，可以得到如下矫顽力表达形式：

（1）磁晶各向异性型：$H_{ci}=p\frac{K_1}{\mu_0 M_s}$ （2.1-17）

（p 取决于晶体结构、饱和磁化强度与外场、易磁化轴方向间的夹角）

（2）应力各向异性型：$H_{ci}=p\frac{\lambda_s\sigma}{\mu_0 M_s}$ （2.1-18）

（p 取决于饱和磁化强度与应力方向间的夹角）

（3）形状各向异性型：$H_{ci}=pM_s$ （2.1-19）

（p 取决于单畴颗粒不同方向的退磁因子）

以上三种矫顽力形式均为理想情况下单畴颗粒矫顽力的表现形式，忽略了单畴粒子间磁偶极矩间的相互作用，实际上由各向异性控制矫顽力的材料，其矫顽力应该是考虑了单畴颗粒间相互作用后的各粒子矫顽力的平均值。

3.3 形(成)核理论

反磁化过程中，畴壁位移的阻力主要来自于应力的不均匀

和掺杂物的存在，而位移存在的先决条件是畴壁的存在，反磁化过程从沿着一个方向饱和磁化的状态开始，在样品已经完全被磁化饱和的情况下，反磁化畴不可能存在。而实际上任何大块磁性材料，即使是相当完整的晶体，也不可避免地存在内应力和掺杂，也就不可能完全被磁化饱和，在内应力和掺杂存在的局部小区域内，磁化矢量往往与整体磁化强度的方向存在偏离或相反，由于其体积甚小，所以称为反磁化核，这些反磁化区域一旦受到足够强的反磁化场将迅速长大，形成反磁化畴。因此，形成一个临界大小的反磁化畴核所需要的反磁化场一般称为形核场，或者成核场，就是材料的矫顽力。

反磁化核形成并长大成为反磁化畴，一般要克服外磁场能、畴壁能、退磁场能的阻力，假设发生不可逆位移的临界磁场为 H_0，则反磁化核能继续长大的条件为：

$$2\mu_0 HM_s dV \geqslant 2\mu_0 H_0 M_s dV + \gamma dS + dF_{退磁}(dV > 0)$$

式中的 dV、dS、$dF_{退磁}$ 等取决于反磁化核的形状和大小。假设反磁化核为一旋转椭球，由上式可以求得形成一个临界大小的反磁化畴核所需要的磁场为：

$$H_s = H_0 + \frac{5}{16}\frac{\pi\gamma}{M_s d_0}$$

$$d_0 = \frac{5\pi\gamma}{16M_s(H - H_0)} \qquad (2.1\text{-}20)$$

H_s 称为形核场（或称启动场），也就是矫顽力。它由两部分组成，当 $\pi\gamma/d_0$ 接近 K_1 时，H_s 又可表述为：

$$H_s = H_0 + \frac{2K_1}{M_s} = H_P + H_N \qquad (2.1\text{-}21)$$

当 $H_P > H_N$ 时，材料的矫顽力由钉扎场 H_P 来决定；当 $H_P < H_N$ 时，材料的矫顽力由形核场 H_N 来决定。由上式不难看出，形核场与畴壁能成正比，如果永磁材料内部晶体结构不完整或者化学成分不均匀，将会导致材料内部畴壁能的不均匀，在某些畴壁能低的区域将会形成反磁化畴核的形成中心，使材料过早地反磁化，从而导致矫顽力的降低，在磁体内可能成为反磁化核形成中心的地方有非铁磁性掺杂物质、第二相、晶粒边界、位错、堆垛层错等晶体缺陷，由于反磁化核形核机理不同，因此形核场是不同的，对于形核场决定材料矫顽力的磁性材料来讲，要力争减小其反磁化畴核的形核中心，以便于提高矫顽力。

3.4　钉扎理论

从上面的讨论来看，反磁化核在外磁场作用下长大成为反磁化畴，然后通过畴壁位移实现反磁化。产生反磁化核的地方一般是晶体缺陷、掺杂物等，缺陷数目、掺杂物等越多，反磁化核越容易形成，矫顽力也就越低。但从另外一方面来看，缺陷对畴壁还具有一定的钉扎作用，阻碍畴壁位移的进行。一般来讲，缺陷对畴壁的钉扎作用主要取决于两种机制：一种是缺陷可以在晶体局部产生应力能和散磁场能，这些能量将对畴壁的结构和畴壁能密度产生影响；一种是缺陷部位的交换作用、磁晶各向异性常数等将发生变化，直接影响畴壁位置的能量变化。在没有外场的情况下，畴壁总位于能量最小的地方，因此，上述能量的变化对畴壁具有钉扎效应，而缺陷越多，对畴壁的钉扎就越强，从而矫顽力就越高。

不同的钉扎中心对畴壁的钉扎机理是不相同的，为简要说明问题，分别介绍两种主要的典型钉扎机制：点缺陷和面缺陷钉扎模型。

3.4.1　点缺陷模型

点缺陷是指晶格点阵上的杂质原子、空穴、间隙原子、原子位错等。点缺陷对畴壁的钉扎作用主要从点缺陷所造成的应力场和磁性常数的变化来体现。由于畴壁面积较大，与之相互作用的点缺陷数目也非常大，如果点缺陷分布均匀的话，它们对畴壁的钉扎作用将相互抵消，因此只有点缺陷的浓度在空间有涨落时，才会对畴壁产生钉扎。假设一块 180° 畴壁受到点缺陷影响并沿一个方向呈现弯曲，那么与畴壁相关的能量包括点缺陷与畴壁的相互作用能、畴壁面积增加引起的畴壁能、外磁场能。根据畴壁平衡方程，对应于阻力最大的外磁场为矫顽力，其表达式为：

$$H_c = (0.40 \pm 0.05)\frac{\rho^{2/3}E_0^{4/3}}{\gamma^{1/3}L^{2/3}}\frac{1}{\mu_0 M_s \delta_0} \qquad (2.1\text{-}22)$$

式中：E_0 为一常数；δ_0 为畴壁基本厚度；L 为畴宽；ρ 为点缺陷密度；γ 为畴壁能密度。上式可以成功解释 $SmCo_5$ 单晶薄片的矫顽力。

3.4.2　面缺陷模型

面缺陷是指在一个晶面两侧的原子受到破坏所形成的层错、晶粒间界、两相边界、晶体表面等。面缺陷对畴壁的钉扎作用主要是通过它们磁性参数与基体之间的差异和变化实现的。考虑面缺陷对一个无限大单轴晶体内 180° 畴壁的影响，晶体将产生两个磁性参量区域，在面缺陷内部，各磁性参量将发生变化，在晶体正常区域，各磁性参量数值不变。与畴壁位移相关的能量可以表述为：

$$F = \int\left[A_i\left(\frac{d\theta}{dx}\right)^2 + K_i\sin^2\theta - \mu_0 HM_i\cos\theta\right]dx \qquad (2.1\text{-}23)$$

式中：第一项为交换能，$A_i = J_i s^2/a$；s 为自旋量子数；a 为晶格常数，第二项为磁晶各向异性能，第三项为外磁场能。i 为不同分区。

根据能量极小值原理，可以近似求得矫顽力表达式：

当外磁场较小时，$\mu_0 HM_s/K < 1$

$$H_c = \frac{2}{3\sqrt{3}} \times \frac{K}{\mu_0 M_s}\frac{D}{\delta_0}\left(\frac{A}{A'} - \frac{K'}{K}\right) \qquad (2.1\text{-}24)$$

当畴壁厚度远小于面缺陷厚度时，$\delta_0 \ll D$

$$H_c = \frac{2K}{\mu_0 M_s}\left(1 - \frac{A'K'}{AK}\right)\frac{(1 - \sqrt{M_2 A'/M_s A})^2}{(1 - M_2 A'/M_s A)^2} \qquad (2.1\text{-}25)$$

式中：K、K' 分别为材料基体和面缺陷的磁晶各向异性常数；A、A' 分别为材料基体和面缺陷的交换积分；M_s、M_2 分别为材料基体和面缺陷的饱和磁化强度。$\delta_0 = (A/K)^{1/2}$ 为畴壁厚度的基本单位。D 为面缺陷的厚度。

将各种材料的磁性参数代入上述两式，则得到矫顽力的理论计算值，其与实验值的比较见表 2.1-2。

根据上表理论和实验结果的比较，平面缺陷对于畴壁位移的钉扎作用是一种比较普遍的机制。畴壁越薄，面缺陷的影响效果越显著，产生的矫顽力也就越大；面缺陷的各种磁性参数越小，矫顽力越大，这为开发和设计高矫顽力永磁材料提供了思路。

3.5　形核与钉扎机制比较

根据 Livingston 的定义，以反磁化畴的形核机制为主控制矫顽力的磁体称为形（成）核型磁体，以阻碍畴壁位移的钉扎机制为主控制矫顽力的磁体称为钉扎型磁体，两种类型的磁体其微观结构、宏观磁性以及磁化过程均呈现不同特征，一般来说，主要有以下几个方面的区别。

表 2.1-2　　根据畴壁钉扎模型计算的材料的矫顽力理论值和实验值比较

计算条件	材　料	M_s (10^3A/m)	K (10^4J/m^3)	A (10^{-11}J/m)	δ_0 (10^{-8}m)	$H_c\left(\frac{1000}{4\pi}\text{kA/m}\right)$	
						理论值	实验值
$\mu_0 HM_s/K<1$	坡莫合金	860	0.02	2.0	32	0.000 4	0.05
	超坡莫合金	630	0.015	1.5	32	0.000 4	0.002
	Ni	485	−0.42	0.5	3.45	0.2	0.7
	Co	1400	45	4.7	1.0	20.7	10
	Fe	1707	4.8	2.4	2.2	0.83	1
	Fe—Si (Si 占 4%)	1570	3.2	2.1	2.6	0.51	0.5
	铝镍钴	915	260	2.0	0.28	656	620
$\delta_0 \ll D$	$SmCo_5$	855	1500	2.0	0.12	12 610	10 000
	$Ce\ Co_5$	794	520	1.3	0.20	2824	2800
	$Pr\ Co_5$	1150	1000	1.1	0.11	6819	5750
	$SmCo_5$	855	1500	2.0	0.12	16 840	10 000
	$Ce\ Co_5$	794	520	1.3	0.20	6287	2800
	$Pr\ Co_5$	1150	1000	1.1	0.11	8346	5750
	$Y\ Co_5$	845	550	1.5	0.17	6226	4600
	$La\ Co_5$	725	630			8340	3600
	MnAl	581	130			2418	5000
	MnBi	700	89			1220	4000
	Pt—Co	756	200			2540	4200

（1）起始磁化曲线：形核场决定矫顽力的永磁材料，起始磁化曲线比较陡峭（起始磁化率高），如图 2.1-6（a）中的 OS 所示；钉扎决定矫顽力的永磁材料，起始磁化强度增加非常缓慢（起始磁化率低）。如图 2.1-7（a）中的 OS 所示。

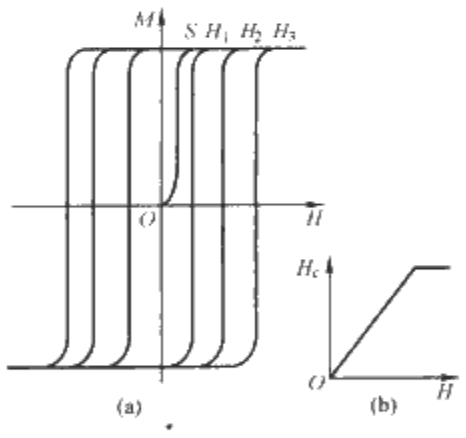


图 2.1-6　形核场决定矫顽力的永磁材料
（a）形核场决定的退磁曲线、磁滞回线；
（b）矫顽力与磁化场 H_a 的关系

（2）矫顽力与磁化场关系：形核场决定矫顽力的永磁材料随磁化场的增加（$H_1<H_2<H_3<\cdots$），反磁化场也增大，矫顽力随之提高，当磁化场增加到等于矫顽力的最大值时，磁场继续增加而矫顽力不再增加。如图 2.1-6（b）所示。而对于钉扎场决定矫顽力的永磁材料，当磁场增加到一个临界场 H_p 时，磁化强度急遽增加，直到饱和，如图 2.1-7（b）所示，只要磁化场大于 H_p，矫顽力就达到最大

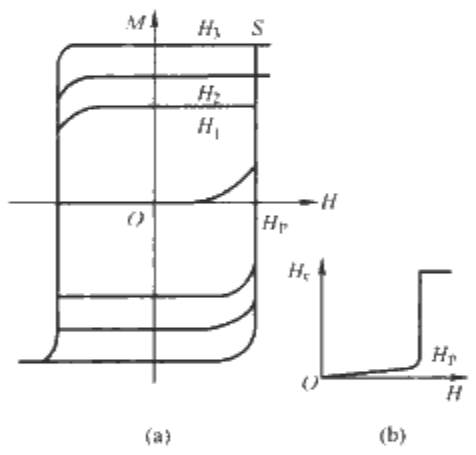


图 2.1-7　钉扎场决定的矫顽力的永磁材料
（a）钉扎场决定的矫顽力的磁化曲线和磁滞回线；
（b）矫顽力随磁化场的关系

值。H_p 为钉扎场，数值上等于矫顽力。

（3）矫顽力的角度关系：假设磁体内易磁化轴理想取向，外场与易磁化轴方向夹角为 θ，对于形核机制来讲，H_c (θ)关系变化曲线基本符合 Stoner-Wohlfarth 公式，随 θ 增加，$H_c(\theta)$开始呈现下降趋势，出现最小值后又随 θ 增加而上升；对于钉扎型磁体来讲，$H_c(\theta)$关系变化曲线基本符合 $1/\cos\theta$ 变化关系。

（4）微观结构：构成形核型磁体的晶粒内部结构较完整，仅在晶粒间界存在结构缺陷，可能成为反磁化核形成中心；钉扎型磁体的晶粒内部存在弥散分布的脱溶物，成为畴壁钉扎的部位。

第2章 永磁材料

1 永磁材料的种类、发展历史及其应用领域

1.1 永磁材料的种类

按照制造工艺和应用特点，永磁材料主要可以分为铸造金属永磁材料、铁氧体永磁材料、稀土永磁材料和其他永磁材料。表2.2-1列出了其主要代表成分及磁性能。从中可以看出，铸造AlNiCo永磁材料具有较高的居里温度，这意味着其磁性能稳定性较好，但是它含有较多的战略金属Co和Ni。铁氧体永磁材料的原材料造价低，资源丰富，但其磁性能偏低，目前铁氧体永磁材料依然占据了永磁材料市场的较大一部分份额。而稀土永磁材料磁性能最高，但是其生产要用到宝贵的稀土原材料，因此其价格较高，其他永磁材料则由于性能及造价原因，市场份额不大。

1.2 永磁材料的发展历史及其应用

根据不同的原料、生产工艺以及性能等特点，永磁材料在其发展历史上呈现出不同的发展阶段以及相应的应用领域。图2.2-1给出了20世纪永磁材料最大磁能积的发展历程。从中可以看出，在20世纪前半叶，永磁材料的磁能积基本低于39.8kJ/m³（5MGOe）以下，而当进入20世纪60年代以来，磁能积开始取得突飞猛进的进展，平均每10年左右，就有一个大的飞跃。从一种新永磁材料的诞生到磁能积的饱和，基本上在几年内就可以完成。目前，以大块全密度纳米复合永磁材料磁能积的发展最为引人关注，采用热压热变形工艺所研制的各向异性纳米复合永磁材料磁能积可达438kJ/m³（55MGOe），人们期待着新一代永磁材料的诞生。

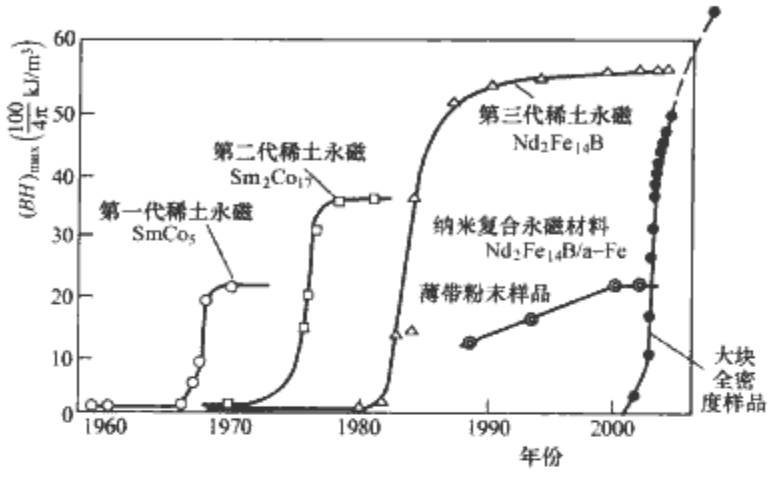


图2.2-1 20世纪永磁材料最大磁能积的进展

永磁材料的应用领域比较广泛，因此按应用领域的分类法也有多种，其中最基本的方法是按物理原理进行分类，表2.2-2给出了按照物理原理进行分类的结果。由此可以看出，永磁体的应用本质上是利用磁体实现各种能量间的转换，而各种能量间的转换实质上是利用了永磁体在某一特定空间产生的静态磁场或者动态磁场、均匀磁场或者是梯度磁场，因此，通过设计不同性能、体积、形状的材料来设计不同的磁场从而制造出各种各样的功能器件，并且随着磁性材料新物理效应的不断发现，其新的应用领域也将不断涌现。

表2.2-1 常用永磁材料的代表成分和室温下的磁性能

类别		系列	主要成分	磁性能			
				Br（T）	H_{ci}(kA/m)	$(BH)_{max}$(kJ/m³)	T_c（℃）
铸造永磁材料		$AlNiCo_5$系	8%～12%Al，15%～22%Ni，5%～24%Co，3%～6%Cu，余Fe（质量分数）	0.7～1.32	40～60	9～56	890
		$AlNiCo_8$系	7%～8%Al，14%～15%Ni，34%～36%Co，5%～8%Ti，3%～4%Cu，余Fe（质量分数）	0.8～1.05	110～160	40～60	860
铁氧体永磁材料		Ba铁氧体永磁材料 Sr铁氧体永磁材料 粘结铁氧体永磁材料	$BaO \cdot 6Fe_2O_3$（分子式） $SrO \cdot 6Fe_2O_3$（分子式）	0.3～0.44	250～350	25～36	450
稀土永磁材料	稀土钴系永磁材料	1：5型钐钴永磁材料	62～63Co，37～38Sm（质量分数）	0.9～1.0	1100～1540	117～179	720
		2：17型钐钴永磁材料	Sm（Co，Fe，Cu，Zr）7.1～7.2	1.0～1.30	500～1400	160～240	800～810
	稀土铁系永磁材料	烧结钕铁硼永磁材料	Nd13.5(Fe,M)余B6.1～7.0(M为微量元素)	1.1～1.5	800～2600	240～440	310
		粘结钕铁硼永磁材料	Nd4～13（Fe，M）余B6.0～20.0	0.6～1.1	800～2100	56～160	310
		1：12型间隙稀土永磁材料	$Sm_2Fe_{17}N_x$，Nd（Fe，Mo）$_{12}N_x$	0.6～1.1	600～2000	56～160	310～600
		纳米复合永磁材料	$Nd_2Fe_{14}B/\alpha-Fe$，$Sm_2Fe_{17}Nx/\alpha-Fe$等	1.0～1.4	240～2300	80～400	
其他永磁材料		Fe-Cr-Co系	33Cr-16Co-2Si-余Fe（质量分数）	1.29	70.4	64.2	500～600
		Fe-Ni-Cu系	16Ni-15Cu-余Fe（质量分数）	1.30	4.8	50～60	500～600
		Pt-Co系	76～78Co余Pt（质量分数）	0.79	320～400	50～80	520～530
		Fe-Pt系	78Pt-余Fe（质量分数）	1.08	340	154	520～530

表 2.2-2 永磁材料的应用领域

物理原理	应用领域	具体应用实例
电—机械转换	电　机	直流电机、步进电机、磁滞电机等
	电流控制	舌簧开关、涡流电机过速开关
	传动装置	激光聚焦、计算机磁盘驱动器等
电—声转换	发声装置、接收声装置	扬声器、耳机、电话等听筒、超声播音器等
磁机械力或转矩	固定或提升装置	各种磁吸盘、房门吸块等
	处理装置	磁分离、复印机磁棍
	磁力耦合及制动装置	
	磁性轴承、磁悬浮列车等	
微波器件电子束离子束聚焦	功率管	磁控管、周期性永磁体
	粒子加速器	同步加速器辐射源，自由电子激光等
	质谱仪	偏转磁体
	阴极射线管	离子阱，聚焦等
	波导管器件	
传感器，电信号传输	利用磁性	霍尔效应、磁阻、温度敏感元件等
	利用体积效应	位置、速度、加速度液体流量等
	利用面积效应	计算机读写磁头
医疗及生物	医疗设备	磁共振成像仪（MRI）、牙科器具、外科器具
	磁疗及磁首饰	
其他应用	真空技术	
	磁位存储偏置场	

2 铸造金属永磁材料

铸造金属永磁材料是应用最早的永磁材料。这类材料的巨大变革是1931年Fe-Ni-Al合金的发明。由于这一发明，使矫顽力达到55.7kA/m（700Oe）。1933年以后，又在Fe-Ni-Al合金的基础上加进了Co、Cu、Ti等元素，经过适当的热处理以后，可获得较高的磁能积，这就是广泛应用于电表工业的铝镍钴型合金。

2.1 铸造金属永磁分类、结构及磁特性

铸造金属永磁材料的历史沿革较久，材料种类繁多，缺乏统一的分类。按材料的内部结构及形成机理可将其分为马氏体磁钢、铁-镍-铝基合金。

2.1.1 马氏体磁钢

马氏体磁钢在19世纪末已开始应用，是发现和应用最早的金属永磁材料，它包括碳钢、钨钢、铬钢、钴钢及铝钢，其永磁性来源于在高温下稳定的奥氏体在淬火过程中转变成为强磁性的马氏体，伴随这种结构转变产生很大的内应力，从而增加了矫顽力，使之成为永磁体。

实验证明，最佳磁性是在称为“马氏体弥散硬化”的状态下获得的。即出现最佳磁性的状态不是马氏体呈集合状态，而是马氏体以极细微粒、高度分散于晶格之中的状态。由于马氏体微粒的高度弥散，使晶格发生严重畸变，造成很大的内应力，从而提高了矫顽力，增加了剩余磁感应强度，使磁能积变大。因此，马氏体磁钢热处理工艺应不使合金全部转变成马氏体，而是使其中一部分成为马氏体并以高度弥散的形式存在。

但是，总体来说马氏体磁钢的矫顽力较低，且结构和磁性的稳定性较差，除了在磁路较长、气隙较小的情况下仍有应用外，已很少使用。下面简单介绍马氏体磁钢的不同品种。

2.1.1.1 碳钢

碳钢的矫顽力随含碳量的增加而增加；但马氏体的饱和磁化强度随含碳量的增加而下降，因而剩余磁化强度也随含碳量的增加而下降。在含碳量为0.8%时，(B_rH_c)之积达到最大值。对于实际应用的碳钢，还含有一些其他杂质。因此，作为永磁材料，一般要求含碳量保持在0.9%～1.0%。这时，$H_{cJ}\approx 4kA/m$，$B_r\approx 0.95\sim 1T$，$(BH)_m\approx 1.6kJ/m^3$。

由于这种材料必须在水中淬火，容易产生裂纹，所以只能用它制造形状简单的器件。

2.1.1.2 钨钢

在碳钢中加入适量的钨，可以改善永磁性能。常用成分为：C约为0.7%，Cr为0.3%～0.5%，W为6.0%。这种钨钢的$H_{cJ}\approx 5.2\sim 5.6kA/m$，$B_r\approx 1.02\sim 1.05T$，$(BH)_m\approx 2.4kJ/m^3$。

钨钢的淬火温度为850℃左右。高温保温15min，快速淬火。高温保温时间太长，永磁性反而下降。

2.1.1.3 铬钢

由于钨的价格较贵，常用铬钢代替钨钢。常用成分为：C为0.9%～1.0%，Cr为3%～6%，此外还加入少量的Mn。铬钢的永磁性能为：$H_c\approx 4.8\sim 5.6kA/m$，$B_r\approx 0.9\sim 0.97T$，$(BH)_m\approx 2.4kJ/m^3$。

铬钢的淬火温度为850℃，油中淬火。

2.1.1.4 钴钢

钴钢的永磁性能较前三种磁钢有明显的提高。这种磁钢的成分范围较广，永磁性能变化较大。通常应用的成分范围为：Co为3%～35%，C为0.75%～1%，Cr为2.8%～9%，另有0.4%～1.5%的Mo。其永磁性能为：$H_c\approx 6.4\sim 20kA/m$，$B_r\approx 0.7\sim 0.95T$，$(BH)_m\approx 3.2\sim 7.2kJ/m^3$。

钴钢的热处理工艺比较复杂，其力学性能较差，只能用磨加工。

2.1.1.5 铝钢

铝钢又称铝铁碳合金。在碳钢中加入适量的铝后，使碳在铁中的固溶度增加，通过淬火，能够得到较高的矫顽力（$H_{cJ}\approx 16kA/m$），可使$(BH)_m$达到$3.98kJ/m^3$。

铝钢采用油中淬火，然后再进行回火处理，回火温度以300℃为宜。

2.1.2 铁—镍—铝基合金

铁—镍—铝基合金是一类非常重要的永磁材料。这类材料又分为两个类型，分别介绍如下。

2.1.2.1 脱溶硬化合金第一类——铝镍合金

Fe—Ni—Al合金在1300～1350℃温度下为单相α'固溶体，呈体心立方相。Fe—Al或Ni—Al有序结构，Al原子在立方晶格的各角点上。当将该合金从高温以10℃/h的速度降到室温时，其结构为两相$\alpha+\alpha'$或三相$\alpha+\alpha'+\nu$。其中α为体心立方近于纯铁的相（夹杂一点Al原子）；ν为面心立方结构，是非磁性相。对永磁体有贡献的是$\alpha+\alpha'$两相，其中α相是强磁性的单畴粒子，弥散在弱磁性的α'相的母体中，这种单畴α相粒子的弥散状态正是高矫顽力的来源。

合金的高温冷却速度对其永磁性影响很大。当Fe—Ni—Al合金从高温（例如1100℃）单相固溶体冷却时，在降温至900～800℃的温区内（约3s），矫顽力H_{cJ}将突然增

加。合金成分和降温速度是影响这种合金永磁体性能的两个关键。

工业生产的铁镍铝合金也叫Ⅲ类磁钢，其典型成分、工艺和性能如下：Ni为25%，Al为12%，其余为Fe。合金被加热到1100℃后，水中淬火。在159kA/m磁场中磁化后，$B_m=1.2T$，$B_r=0.69T$，$H_c\approx37.8kA/m$，$(BH)_m\approx11kJ/m^3$，可逆磁导率$\mu_r\approx4$，密度$\rho\approx7.1g/cm^3$。这种合金质硬而脆，难以机械加工。

碳杂质将使磁性变坏，应尽量减少碳的含量。有时加入少量的Ti或Nb，以降低碳的影响。

2.1.2.2 脱溶硬化合金第二类——铝镍钴合金

在铝镍型合金的基础上，加入一定数量的Co及少量的Cu、Ti、Nb、Si等元素形成铝镍钴合金。它是在稀土永磁发现前磁性能最好的永磁材料。

铝镍钴合金在约1250℃时是属于体心立方结构的单相固溶体。当冷却至850～750℃时，固溶体发生Spinodal分解（不通过成核长大而直接形成新相）成为晶格常数稍有差别的两个另外的体心立方相α和α'。富Ni、富Al的α相为母相，是弱磁性的；富Fe、富Co的α'相成针状（直径约为$10^{-8}m$，长度约为$10^{-7}m$），是强磁性相，高度弥散在α相基体中，形成沉淀物，通常称为脱落。随着温度的下降，两相成分的偏离更加明显，因而两相的饱和磁化强度之差也更大。

铝镍钴合金的反磁化过程，被认为是α'相单畴针状粒子磁矩的非一致转动，矫顽力主要来源于形状各向异性。因此，粒子的长径比越大，表面越光滑，两相的饱和磁化强度差越大，矫顽力便越大。Ti的加入能够提高铝镍钴合金矫顽力的原因，可能就是由于Ti能使针状粒子的长径比增加和使表面更加光滑。

铝镍钴合金按其磁性又分为各向同性合金和各向异性合金两种：

（1）各向同性铝镍钴合金的磁性不随方向而变化，但矫顽力和磁能积都比较低。这类合金的成分范围为10%～12% Al，15%～20%Ni，5%～14%Co，0～6%Cu，其余为Fe；典型热处理工艺是：将铸造后的样品加热到1200～1250℃，迅速冷却，在经过900～800℃时，降温速度在0.5～5℃/s之间。然后，在600℃左右回火6h。其主要磁性能为：B_r为0.68～0.75T，$H_c\approx35.8\sim51.7kA/m$，$(BH)_m\approx12kJ/m^3$。

（2）各向异性铝镍钴合金。它包括两种情况：一种是通过磁场热处理造成磁结构，使合金具有易磁化方向，沿这个方向具有特别好的永磁性能；另一种是通过控制温度使合金的晶粒沿一个方向生长，形成柱状晶，柱状晶的轴线方向为易磁化方向，沿这一方向具有优于其他方向的永磁性能。

晶体生长先在温度低的地方开始。在浇铸铝镍钴铸件时，如果将砂型放在通水冷却的钢板上，浇铸钢液后随即用石棉布将砂型包好，待砂型冷却后，其合金结晶为沿垂直于钢板方向的柱状晶，柱状晶的生长方向为[100]晶轴方向。沿该方向进行磁场热处理，可得到具有高磁能积的铝镍钴合金。

铝镍钴合金在居里温度以下发生Spinodal分解，这时加上大约79.6kA/m以上的外磁场，则针状分解物便沿最接近外磁场的[100]方向择优取向，从而使该方向的B_r、H_C、$(BH)_m$都有明显提高。例如，铝镍钴Ⅴ类合金的居里点为860～900℃，所采用的磁场热处理温度一般为800℃左右，在这一温度下保温一段时间（在10min以上），降温后再进行回火，便得到各向异性的Ⅴ类磁钢。

铝镍钴合金按其成分又分为Ⅴ类合金和Ⅶ类合金。Ⅴ类合金的成分范围为：7%～9%的Al，11%～20%的Ni，22%～25%的Co，3%～4%的Cu，其余为Fe，外加1%～5%的Ti或0.2%～2.5%的Nb，有时加0.4%～0.8%的Si或Ca。这类合金的特点是剩磁B_r较高，但矫顽力H_c较低，磁能积(BH)约为$40kJ/m^3$左右。Ⅶ类合金的成分范围为：7%的Al，14%～15%的Ni，34%～36%的Co，3%～4%的Cu，5%～7.5%的Ti，0.2%的Si，其余为Fe。这类合金的特点是剩磁B_r稍低，但矫顽力H_c高，因而磁能积$(BH)_m$也较高，通常约为$64kJ/m^3$左右；柱状晶产品可高达$87.5kJ/m^3$。

铸造金属永磁材料的磁性能见表2.2-3。表中材料名称一栏内的数字表示以kJ/m^3为单位的最大磁能积。

表2.2-3 铸造金属永磁材料的磁性能

材料名称	符号或牌号	成分(MS%)	特性									
			B_r	H_c		$(BH)_m$		有用回复能	回复磁导率	温度系数	密度	最高工作温度
			T (10^4G)	kA/m	Oe	kJ/m³	10^6 GOe	E_{rec} 10^6(GOe)	μ_r	α%/℃	(g/cm³)	(℃)
17%钴钢		18.5Co，3.75Cr，5W，0.75C，余Fe	1.07	13	163	5.5	0.7	0.2	15	−0.01	8.35	150
36%钴钢		38Co，3.8Cr，5W，0.75C，余Fe	1.04	18	226	7.8	1.0	0.3	12	−0.01	8.2	150
铸造铝镍钴11	* LNG_{11}（$AlNiCo_7$）	12Al，21Ni，5Co，3Cu，余Fe	0.72	37	465	11.0	1.4	0.7	6.4	−0.02	7.1	450
铸造铝镍钴13	LNG_{13}（$AlNiCo_2$）	10Al，19Ni，13Co，3Cu，余Fe	0.75	45	565	13.5	1.7					
铸造铝镍10	LN_{10}（$AlNiCo_8$）	12Al，25Ni，3Cu，余Fe	0.70	38	476	10.7	1.3					
铸造铝镍钴44	LNG_{44}（$AlNiCo_5$）	8Al，14Ni，24Co，3Cu，余Fe	1.28	51	641	44.0	5.5	1.5	4.1	−0.02	7.3	550
等轴晶铝镍钴52	LNG_{52}（$AlNiCo_5$ DG）	8Al，14Ni，24Co，3Cu，余Fe	1.33	53	666	52.0	6.5	—	4.0	—	7.3	550
柱状晶铝镍钴60	LNG_{60}（$AlNiCo_5$ col.）	8Al，14Ni，24Co，3Cu，余Fe	1.35	59	741	60.0	7.5	2.1	3.0	—	7.3	550
高矫顽力铝镍钴	LNG_{52} J（$AlNiCo_8$ HC）	8Al，14Ni，28Co，3Cu，8Ti，余Fe	0.72	150	1885	40.0	5.0	2.3	2.0	—	7.3	550
铸造铝镍钴72	LNG_{72}（$AlNiCo_9$）	7Al，15Ni，35Co，4Cu，5Ti，余Fe	1.05	120	1508	72.0	9.0	3.6	1.3	—	7.3	550
柱晶高矫顽力铝镍钴	（col. AlNiCoHC）	7Al，14Ni，40Co，3Cu，7.5Ti余Fe	0.97	150	1885	91.5	11.5					
柱晶高矫顽力铝镍钴	（col. AlNiCoHC）	7Al，14Ni，39Co，3Cu，8Ti余Fe	0.88	170	2136	77.0	9.7					

2.2 应用基本知识

马氏体磁钢由于磁性太低已经很少使用。铁一镍一铝基合金曾经是应用非常广泛的一类永磁材料，这类材料有以下特点：

（1）具有高的剩余磁感应强度。铸造铝镍钴合金的 B_r、一般在 0.7T 与 1.35T 之间，此值约为铁氧体永磁材料的 3 倍，与钕铁硼永磁材料的 B_r 相接近。

（2）矫顽力较低。多数铝镍钴合金的 H_c 在 48kA/m 与 64kA/m 之间，即使高矫顽力铝镍钴合金的 H_c 也不过 151kA/m 左右。这一数值比铁氧体永磁材料的 H_c 约低一倍，仅为钕铁硼永磁材料 H_c 的 1/5 到 1/8。

（3）具有较高的最大磁能积。其中，铝镍合金的 $(BH)_m$ 约为 9.5～11.1kJ/m^3，各向同性铝镍钴合金的 $(BH)_m$ 约为 11.9～13.5kJ/m^3，各向异性铝镍钴合金的 $(BH)_m$ 一般在 39.8～71.6kJ/m^3 之间，柱状晶高矫顽力铝镍钴合金的 $(BH)_m$ 可高达 91.5kJ/m^3，这是在稀土永磁材料被发现前永磁材料所能达到的最高 $(BH)_m$ 值。

（4）具有较高的居里温度和工作温度。铸造金属永磁材料的居里温度和工作温度因成分不同而有较大的变化。铝镍钴Ⅴ类合金的居里温度在 890℃左右，最高工作温度在 550℃左右；铝镍钴Ⅶ类合金的居里温度在 860℃左右，最高工作温度在 520℃左右。可以说，它们是永磁材料中居里温度和工作温度最高的一类。

（5）具有低温度系数。正因为铝镍钴永磁材料具有较高的居里温度，因而温度系数很小。剩磁的温度系数为－0.02%/℃，矫顽力随温度的变化很小。因此，铝镍钴永磁具有很高的温度稳定性。

（6）铝镍钴合金的机械性能差，质地硬而脆，只能进行简单的磨加工。对形状复杂的产品可采用粉末烧结方法，但用粉末烧结制成的产品，磁性较差。例如，烧结高矫顽力铝镍钴所能达到的磁性能为：$B_r \approx 0.67 \sim 0.74$T，$H_c \approx 120 \sim 135$kA/m，$(BH)_m \approx 32 \sim 36$kJ/m^3。

（7）合金中含有较多的镍和钴，因而价格较贵。

由于铁一镍一铝基永磁合金具有以上特点，在 20 世纪 80 年代以前曾被广泛应用于以下方面：

（1）用作各种磁电式仪器仪表的永磁体。对于仪器仪表来说，通常要求精度高、稳定性好，铁氧体永磁难以达到这一要求，因而主要应用铝镍合金或铝镍钴合金。直到现在，在一些较精密的仪器仪表中仍然用铝镍钴材料作为永磁体。

（2）用作各种永磁电机的永磁体。永磁电机的优点是不需要励磁绕组，因而体积小，制作简单。在稀土永磁材料被应用以前，其永磁体主要用铝镍钴永磁材料。

（3）用作扬声器中的永磁体。扬声器的磁路分为内磁式和外磁路两类。内磁式磁路多采用铝镍钴材料作为永磁体，一般地说这类扬声器质量较好。

（4）用作核磁共振仪中的永磁体。近年来，核磁共振波谱仪的应用越来越广泛，因而用于这方面的永磁材料也越来越多。该设备对磁场的要求特别苛刻，不但要求场强高（约 795kA/m），而且要求磁场的均匀性好（在 1cm^3 的范围内磁场的均匀度需达到 10^{-6}，甚至更高）、稳定性好。所以最初应用的就是铝镍钴材料。

近十多年来，铝镍钴永磁的年产量不断下降，现在的年产量大约在 5000t 左右。这是因为铁氧体永磁的性能进一步提高，在扬声器、磁力机械方面的应用正在逐步取代铝镍钴永磁；另一个原因是钕铁硼永磁的性能迅速得到完善，在价格方面不断降低，因而在小型电机、电子仪表和民用电器等方面得到大量的应用。再加上钴的价格不断提升，所有这一切都对铝镍钴永磁合金的生产造成了不利影响。目前铝镍钴永磁材料年产值已经不到永磁材料年产值的 1/10。

3 铁氧体永磁材料

铁氧体永磁材料是应用非常广泛的一类材料。这类材料的主要特点是：原料丰富，制备工艺比较简单，性能价格比占有一定的优势；矫顽力虽不及稀土永磁材料，但远高于金属永磁材料，较适合在退磁因子较大的情况下使用；饱和磁感应强度不是太高，因而剩余磁感应强度也不是太高，用它不能产生太强的磁场。

3.1 铁氧体永磁材料的结构及磁性

铁氧体永磁材料主要包括钡铁氧体和锶铁氧体两大类。钡铁氧体是文特（went，J. J.）等人于 1952 年首先研制成功的，其生产工艺于 1954 年问世，锶铁氧体于 1963 年开始投产。这两类铁氧体的晶体结构及磁结构完全相同、磁性质也非常相似。下面以钡铁氧体为例介绍它们的结构与磁性。

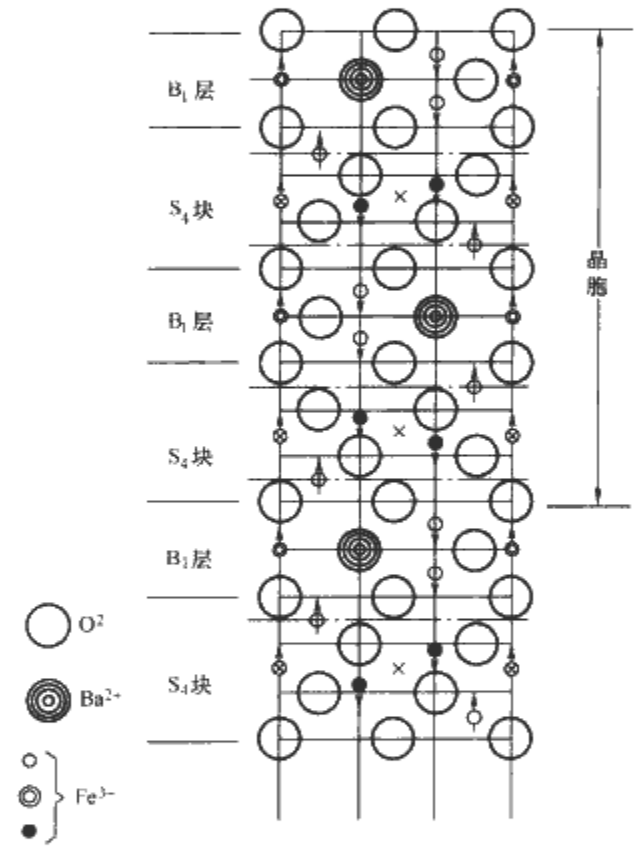


图 2.2-2 $BaFe_{12}O_{19}$ 晶胞沿（110）纵截面的离子排列

图 2.2-2 中大白圆代表氧离子；画圈大圆代表钡离子；三种小圆代表铁离子［Went et al. Philips Tech. Rew.，13，194（1952）］。

钡铁氧体的分子式为 $BaO \cdot 6Fe_2O_3$（或写为 $BaFe_{12}O_{19}$），晶体结构与天然磁铅石 $Pb(Fe_{7.5}Mn_{3.5}Al_{0.5}Ti_{0.5})O_{19}$ 相似，属于六角晶系，空间群为 $D_{1/6h}$（C6/mmm）。两个 $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ 分子构成一个晶胞。每个晶胞包含 10 个氧离子密集层，每层有 4 个氧离子。其中两层各有一个氧离子被钡离子所代替，称为含钡层，通常用 B_1 表示。在两个 B_1 之间，有 4 个氧离子层，这 4 个氧离子层组成的结构与尖晶石型铁氧体 γ-Fe_2O_3 相同，称为尖晶石块，以 S_4 表示。在尖晶石块 S_4 中，有 7 个铁离子占据由氧离子组成的八面体的中心（称为 B 位），2 个铁离子占据由氧离子组成的四面体的中心（称为 A 位）。每个含钡层 B_1 中，有 3 个铁离子，

它们周围的氧离子构成不太规则的多面体。与各氧离子层相垂直的是具有六角对称的C轴方向。沿C轴，10个氧离子层的排列顺序是 $B_1S_4B_1^*S_4^*$，其中 B_1^* 是 B_1 绕C轴旋转180°的结果，S_4^* 是 S_4 绕C轴旋转180°的结果。图2.2-2画出了上述晶胞通过C轴的一个纵剖面（110）晶面上的离子分布。具有上述结构的钡铁氧体称为M型钡铁氧体，$BaO \cdot 6Fe_2O_3$ 又写为BaM。

除M型外，还有4种有类似结构的钡铁氧体，分别被称为W型、X型、Y型和Z型。不同类型的主要区别是氧离子层与含钡层的重复次数不同，并且一般地说后4种结构的铁氧体不具有永磁特性，在此不再介绍。

$BaFe_{12}O_{19}$ 的磁性来自它所含的铁离子，但各晶位上铁离子的磁矩方向并不完全相同。我们用下面的示意图表示各晶位铁离子的磁矩方向（铁离子的磁矩为 $5\mu_B$），由此可得，分子饱和磁矩 $m=(-10+35-10+5)\mu_B=20\mu_B$。在 $T=1.3K$、$H=4.77\times10^3kA/m$ 条件下，实验测得 $m=19.7\mu_B$，与计算很接近。正因为这类材料的分子饱和磁矩来自不同晶位离子磁矩的代数和，故它们的饱和磁化强度不太高。对于 $BaFe_{12}O_{19}$，$M_s=380\times10^3/4\pi$（A/m）；对于 $SrFe_{12}O_{19}$，$M_s=370\times10^3/4\pi$(A/m)。此外，在这类材料中，磁性离子间的交换作用是通过氧离子进行的间接交换作用，交换积分A较小，因而居里温度较低。$BaFe_{12}O_{19}$ 的 $T_c=450℃$，$SrFe_{12}O_{19}$ 的 $T_c=460℃$。与此有关的是，饱和磁化强度随温度升高而较快下降（图2.2-3给出了 $BaFe_{12}O_{12}$ 比饱和磁化强度 σ_s 随温度的变化），这使 Br 有较大的温度系数。作为永磁材料，上述磁特性是很不利的。

	S_4		B_1	
	A位	B位	11A位	11B位
磁性离子	$2Fe^{3+}$	$7Fe^{3+}$	$2Fe^{3+}$	$1Fe^{3+}$
磁矩方向	←	→	←	→
各晶位磁矩	$-10\mu_B$	$-35\mu_B$	$-10\mu_B$	$-5\mu_B$

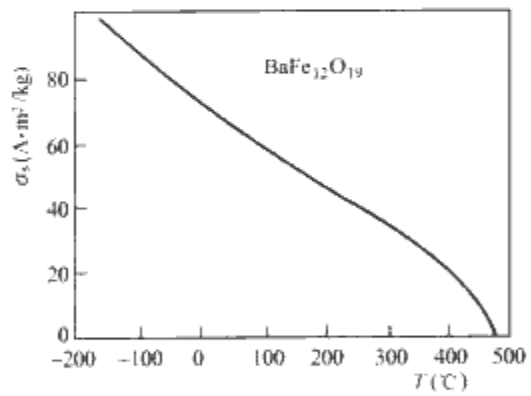


图2.2-3 $BaFe_{12}O_{19}$ 之 $\sigma_s\sim T$ 曲线

永磁材料的另一个重要技术参量是矫顽力 H_c，矫顽力的大小与材料的磁各向异性有关。BaM和SrM具有单轴磁晶各向异性并有很高的磁晶各向异性常数 K_1，这是它们成为较好的永磁材料的重要原因。从反磁化理论来看，反磁化过程有两种机理：磁化矢量转动和畴壁位移。由磁化矢量转动决定的矫顽力 $H_{cJ}=0.48[2K_1/\mu_0M_s-(N_c-N_a)]$，$N_c$ 和 N_a 分别为平行和垂直C轴的退磁因子。由畴壁位移决定的矫顽力 $H_{cJ}=\dfrac{H_0}{\cos\theta}$，$\theta$ 为位移结束时磁矩与外磁场间的夹角，H_0 为 $\theta=0$ 时发生不可逆畴壁位移的临界场。一般地说，前者决定的矫顽力远大于后者。但是，发生磁化矢量转动的前提条件是磁性颗粒为单畴粒子。由铁磁学知识可知，铁磁颗粒成为单畴粒子的临界半径为 $R_C=\dfrac{9\gamma}{\mu_0M^2}$，其中 γ 为畴壁能密。对于钡铁氧体，$R_C\approx0.45\sim0.50\mu m$。Ratnam D.V. 等人对平均颗粒尺寸为0.4～200μm的钡铁氧体进行了研究，发现粒径在100～200μm范围内，H_{cJ} 与 $\cos\theta$ 成反比，反磁化以畴壁位移为主；当粒径减少到0.5μm时，$H_{cJ}\alpha[2K_1/\mu_0M_s-(N_c-N_a)M_s]$，反磁化以磁化矢量转动为主。粒径在以上两者之间时，两种反磁化过程共存。如以 α 表示参与畴壁位移的粒子百分数，则有：

$$H_{cJ}=(1-\alpha)0.48[2K_1/\mu_0M_s-(N_c-N_a)M_s]+\alpha\frac{H_0}{\cos\theta} \tag{2.2-1}$$

当粒径继续减小直到小于0.01μm时，H_{cJ} 急剧下降，这是因为粒径已经进入超顺磁性粒度范围；而当粒径在0.01～1μm之间时，测得的矫顽力也低于按畴转模型计算的理论值，这可能是由于粒子结晶不够完美所致；当粒径大于1μm时，H_{cJ} 随粒径的增加而迅速下降，这是因为出现了多畴结构。所以，为了使BaM具有高的矫顽力，颗粒度的分布最好介于0.1～1μm之间。与BaM性能相近的还有SrM和PbM。现将它们的基本物理特性列于表2.2-4，以供参考。

表2.2-4 永磁铁氧体的基本特性（室温）

	BaM	PbM	SrM
M_s（kA/m）	380	320	370
K [$\times10^5$（J/m³），20℃]	3.3	3.2	3.6（3.7）
D（g/cm³）	5.3	5.6	5.1
θ_f（℃）	450	452	460
$(BH)_m$（kJ/m³）（理论）	43	35.8	41.4
ρ（Ω·cm）	≥10^8		≥10^8
H_{cJ} [$\times10^3/4\pi$（kA/m）]（理论）	6.9	5.4	8.1
σ_s（A·m²/kg）	71.7	58.2	72.5

注 表中BaM=$BaO\cdot6Fe_2O_3=BaFe_{12}O_{19}$，余类推；钡铁氧体磁感应强度的温度系数 $\beta_B\approx0.2\%/℃$；热膨胀系数=10.3×10^{-6}；热传导率=1.6×10^{-3}。

3.2 钡铁氧体材料

钡铁氧体材料是所有永磁材料中价格较低廉的一种永磁材料，也是应用较广泛的一种永磁材料。前面已介绍了这种材料晶体结构及主要磁特性。在那里指出，由于其分子饱和磁矩是不同晶位离子磁矩的代数和，因而饱和磁感应强度不够高（$B_s=477mT$）。对于易磁化轴混乱分布的单轴晶体颗粒来说，$B_r=B_s/2$，剩余磁感应强度也不够高。特别是，B_r 的温度系数较大（$\beta_B\approx0.2\%/℃$），这使该产品只限于在电声器件和磁力机械中应用。

$BaFe_{12}O_{19}$ 成为永磁材料的最重要条件是它具有单轴磁晶各向异性并具有较大的磁晶各向异性常数（$K_1=3.3\times105J/m^3$），因而有较高的内禀矫顽力 H_{cJ}。正因为如此，这种材料的 H_{cJ} 和 H_{cB} 有很大区别。在退磁曲线上，使 B 下降为零有两种可能：①在反向磁场的作用下，剩余磁化强度不断下降，直至 $-H+M=0$，这样所得的 H_{cB} 与 H_{cJ} 相差很小，对两者可以不加区分，铸造金属永磁材料就属于这个类型；②反向磁场不足以使剩余磁化强度下降，$B=0$ 是反向外磁场（$-H$）与 Mr 相抵消的结果，因此 B 的退磁曲线应满足下式：

$$B = \mu_0 (M_r - H) = B_r - \mu_0 H \qquad (2.2\text{-}2)$$

在这种情况下，H_{cJ} 远大于 H_{cB}。铁氧体永磁材料属于这个类型。由式（2.2-2）不难得到下式：

$$(BH)_m = \frac{1}{4}\frac{B_r^2}{\mu_0} \qquad (2.2\text{-}3)$$

可见，欲提高材料的最大磁能积 $(BH)_m$，应首先提高剩余磁感应强度 B_r。提高 B_r 的一个重要方法是制备各向异性的铁氧体永磁材料，这也是本节所要介绍的一个重要内容。需要指出的是，式（2.2-2）和式（2.2-3）是在设定 H_{cJ} 无限大的情况下所得的理论结果，H_{cJ} 并非无限大，因此 $(BH)_m$ 总比 $\frac{1}{4}\frac{B_r^2}{\mu_0}$ 要小一些。

制备钡铁氧体材料通常采用氧化物陶瓷工艺。下面将制备工艺中的一些问题及各向异性钡铁氧体的制备作一必要的说明。

3.2.1 钡铁氧体制造工艺中的一些问题

钡铁氧体的制造工艺与陶瓷工艺相类似，大致可分为七个工序：配料—混料和球磨—预烧—二次球磨—成型—烧结—整形与测试。

3.2.1.1 配方

按钡铁氧体的分子式 $BaFe_{12}O_{19}$，原料的比例应为 $BaO : Fe_2O_3 = 1 : 6$。实际上当 Fe_2O_3 的比例略低于 6 时其磁性反而更好一些，这是因为：

（1）当 Fe_2O_3 的比例低于正分比例时可使晶格结构产生某些缺陷，有利于离子扩散，使材料密度提高、B_S 和 B_r 增加；

（2）Fe_2O_3 的比例低于正分比例 6 : 1 时，在晶粒边界上会出现第二相 $BaO \cdot Fe_2O_3$，有利于阻止晶粒长大；

（3）球磨时总有一部分铁加入，烧结时一部分碱土氧化物挥发。基于以上原因，Fe_2O_3 与 BaO 的配方比例应小于 5.9 : 1。进一步研究表明，当 Fe_2O_3 的纯度较低时，BaO 的含量应当更高一些。因为 Fe_2O_3 的纯度越低，它的含硫杂质量越高（工业纯 Fe_2O_3 的含硫量的 0.47%）。在钡铁氧体烧结过程中，这些硫杂质在钡铁氧体生成（约在 800℃开始）前已与 BaO 生成稳定的 $BaSO_4$（约在 700℃），这样须消耗 2%左右的 BaO。考虑到以上因素，工业生产中的原材料配方 $BaO : Fe_2O_3$ 可在 1 : 5.5 左右。

3.2.1.2 添加物的影响

为了改善钡铁氧体的磁性能，人们进行了各种添加物的实验，行之有效的有以下几种：

（1）高岭土。高岭土[$Al_2O_3(SiO_2) \cdot 2H_2O$]是高岭土类矿物组成的一种黏土，价格低廉。加入 0.5%～1.0%的高岭土有利于细化晶粒，可使 ${}_BH_C$ 提高 15%，$(BH)_m$ 增加 30%。因此是人们常用的添加物。

（2）Al_2O_3。用 Al 代换 Fe 可使磁晶各向异性场增加，使内禀矫顽力大幅度提高，但同时使 M_S 线性下降、T_c 迅速降低。因此这种代换仅限于使 $BaFe_{12-2x}M_{2x}O_{19}$ 中的 x 在 0.5～1 之间。

（3）SiO_2。Si 可与 Ba 生成 $BaSi_2O_5$，当 $T > 1000$℃时，它呈液相玻璃态，聚集于晶粒边界，有利于阻止晶粒生成，因而少量 SiO_2 的加入有助于矫顽力的提高和磁能积的增加。

（4）稀土氧化物。研究最多的是加入 La_2O_3。La^{3+} 代换 Ba^{2+} 后使分子式变为 $La^{3+}Fe^{2+}Fe_{11}^{3+}O_{19}$，分子磁矩由 $20\mu_B$ 减小为 $19\mu_B$，磁晶各向异性常数 k_1 增加。因而少量 La_2O_3 的添加可增加矫顽力，对 B_r 影响不大，从而提高 $(BH)_m$。对配比为 $(BaO)_{1-x}(La_2O_3)_{x/2}5.6Fe_2O_3$ 的组成，当 $0 \leqslant x \leqslant 0.12$ 时磁性能最佳。此外，轻稀土元素 Ce、Pr、Na 的代换量为 7%～10%时，也有利于磁能积的提高。

3.2.1.3 对原料的要求

钡铁氧体以及其他永磁铁氧体对原料纯度的要求并不苛刻。为了降低成本，国内不少厂家用铁鳞、硫酸渣以及铁精矿粉代替 Fe_2O_3。铁鳞是在热轧钢过程中热轧钢板表面氧化的铁屑，主要成分为 Fe_3O_4。硫酸渣是在用硫铁矿（FeS_2）制备硫酸（H_2SO_4）过程中所残留的铁的氧化物，主要成分为 Fe_3O_4 或 Fe_2O_3。铁精矿粉是多年风化后铁矿石。上述材料在经过水洗、磁选和氧化后便可作为制备永磁铁氧体的原料。BaO 很不稳定。一般采用 $BaCO_3$ 代替 $BaO \cdot BaCO_3$ 在 900～1000℃之间分解为 BaO 和 CO_2。这样得到的 BaO 有很好的化学活性。也可以用 $Fe(NO_3)_3$ 和 $Ba(NO_3)_2$ 作为制备钡铁氧体的原料，其优点是纯度高、化学活性好，缺点是成本高，所产生的大量酸气对生产带来危害。

3.2.1.4 对烧结的要求

为了使钡铁氧体充分化合并具有较高的密度以获得高 B_r，应适当地提高烧结温度和延长烧结时间。但这样一来，晶粒便会长得过大，很容易超过单畴颗粒的尺寸，以致矫顽力严重下降。为了解决这一问题，通常在制备工艺上采取以下方法：

（1）预烧—球磨—烧结。将混合并球磨好的粉料压成饼状进行预烧。预烧时温度较高（1300℃左右）、时间较长（几个小时），使原材料充分化合形成完全的铁氧体。然后高温出炉淬火，破碎，进行二次球磨，直至绝大多数颗粒的尺寸在单畴粒度（上径为 1μm）以下。将这样的粉料压制成型，进行正式烧结，正式烧结的温度较低（1100～1200℃），以避免晶粒再度长大。

（2）短时间高温烧结。烧结时温度较高，以致有液相出现，造成塑性流动。这可使反应完全，密度增高。为了不使晶粒长大，烧结时间一定要短并且降温要快。这一方法的缺点是，因为冷却太快，产生很大的内应力，使产品变脆。正是基于这一原因，此法已很少使用。

3.2.2 各向异性钡铁氧体的制备

按上述工艺制备的钡铁氧体是各向同性的。虽然具有很高的 H_{cJ}，但 B_r 较小，因此 H_{cB} 不可能大，$(BH)_m$ 也不可能大。我们设想，如果在钡铁氧体的烧结过程中使各晶粒的 C 轴（即易磁化轴）取向一致，这将使 $B_r \approx B_S$，与各向同性钡铁氧体相比其 B_r 将近扩大一倍，$(BH)_m \approx \left(\frac{B_r}{2}\right)^2$ 将近为原来的四倍。具有这样性能的钡铁氧体称为各向异性钡铁氧体。各向异性钡铁氧体的研制成功是这种材料被广泛采用的重要原因。

按照以上设想，制备各向异性钡铁氧体需要注意解决如下几个技术问题：

（1）作为制备各向异性钡铁氧体的粉料必须是具有铁磁性的单畴粒子。这个问题可以通过对经过一次球磨的原材料进行预烧和第二次球磨加以解决。

（2）在对样品的压型过程中需要对粉料加一较强的恒定磁场。这样的磁场可用电磁铁来产生。为了提高磁化效果，与粉料串联的磁路应当用导磁材料（如高碳钢），与粉料在磁路上并联的模具部分应当用无磁材料（如高锰钢、无磁硬质合金钢等）。经验表明，压型开始时，磁化场约在 199kA/m即可。在对粉料压紧后，磁化场应保持在 637kA/m 左右。

（3）在磁场成型的过程中，粉料的颗粒应能较自由地转

动。为此，采取如下措施：一是二次球磨一定要采用湿磨，这样制备的颗粒表面圆滑，有利于转动；二是将粉料加水，制成料浆，将料浆置于模具中压制成型。料浆的含水量一般小于25%～35%。为了使压制的坯料成型，必须在压制过程中将料浆中所含的水分逐步排出。为此在料浆下面垫一层滤纸，在滤纸下面的模具上均匀地开一些网状小孔（孔径约为1.5～3mm），以便将水排出。也有人用机械泵帮助抽水。

（4）在湿压磁场成型后，样品中绝大多数磁性粒子的易磁化轴被取向在外磁场方向。那么在烧结的过程中各个粒子的易磁化轴能否继续保持方向一致呢？实验表明，随着烧结温度的提高，这种一致性不但不会遭到破坏，还会进一步加强。表2.2-5说明了这一问题。表中 $B_{r\perp}/B_{r//}$ 表示易磁化轴的取向程度。在完全各向异性的材料中，$B_{r\perp}/B_{r//}=0$；在各向同性的材料中，$B_{r\perp}/B_{r//}=1$。由表可见，随着烧结温度的提高，材料的各向异性表现得越来越强。从该表还可以看出，烧结温度高，B_r 增大，H_{cJ} 下降。B_r 增大除与晶粒的整齐排列有关以外，还与密度增加有关。H_{cJ} 的下降则与晶粒长大形成多畴结构有关。所以，为了获得优良的永磁性能，烧结过程也是制备钡铁氧体的一个重要工序。

3.3 锶铁氧体材料

锶铁氧体与钡铁氧体有完全相同的晶格结构和相似的物理特性。两者不同的是：

（1）锶铁氧体的晶格常数（$a=5.876\times10^{-10}$m，$c=23.08\times10^{-10}$m）略小于钡铁氧体的晶格常数（$a=5.89\times10^{-10}$m，$c=23.20\times10^{-10}$m）；锶铁氧体的密度（$d=5.1$g/cm^3）略小于钡铁氧体的密度（$d=5.3$g/cm^3）。

（2）锶铁氧体的磁晶各向异性常数（$K_1=3.7\times10^5$ J/m^3）比钡铁氧体的磁晶各向异性常数（$K_1=3.3\times10^5$ J/m^3）约大10%，因而有更大的单畴临界尺寸和更大的内禀矫顽力。

（3）由于锶铁氧体的单畴临界尺寸较大，烧结时易于得到结晶良好的产品，故其磁性能较钡铁氧体为优。Cochardt·A曾对2万只各向异性的铁氧体永磁进行对比，结果发现在 B_r 相同的条件下，S_rM 的 H_c 比BaM的 H_c 约高30%，重量约轻4%。可见，锶铁氧体更适用于在高退磁场下工作。

表2.2-5 烧结温度 T 对磁致晶粒取向的 $BaFe_{12}O_{19}$ 的影响

T (℃)	D (g/cm^3)	$B_{r//}$ (10^{-4}T)	$B_{r\perp}$ (10^{-4}T)	$\frac{B_{r\perp}}{B_{r//}}$	H_{cM} $\left(\frac{1}{4\pi}\text{kA/m}\right)$
1250	4.06	2700	1210	0.45	3210
1275	4.36	2920	1250	0.43	2850
1300	4.66	3260	1170	0.36	2470
1320	4.84	3620	720	0.20	1170
1340	4.88	3850	250	0.07	<200

注 1. 对各向同性的钡铁氧体，目前典型的磁性能为：$B_r=230$mT，$H_{cJ}=260$kA/m，$H_{cB}=150$kA/m，$(BH)_m=8.4$kJ/m^3，最高工作温度≈400℃。

2. 对各向异性的钡铁氧体，目前较典型的磁性能为：$B_r=380$mT，$H_{cB}=190$kA/m，$(BH)_m=28$kJ/m^3，最高工作温度≈400℃。

关于锶铁氧体的配方应注意两个问题：

（1）在SrM中加入少量的CaM，形成锶钙铁氧体，这样做有利于微晶生成片状形态，增加烧结时的晶粒取向度，促进固相反应，提高磁性能。研究表明，在分子式 $(S_rO)_{1-x}(CaO)_x\cdot RFe_2O_3$ 中，通常取 $x=0.05$。

（2）与钡铁氧体相似，对 Fe_2O_3 的配比应小于正分值，以上式中的 $R=5.6$ 为宜，而当 $R=6$ 时其矫顽力和磁能积明显下降。

制备锶铁氧体同样需要添加剂。制备钡铁氧体所用的添加剂原则上可适用于锶铁氧体，但也略有不同，下面介绍在锶铁氧体中常用的几种添加剂：

（1）SiO_2。添加 SiO_2 可以细化晶粒，提高 H_C。一部分 Si^{4+} 可进入晶格，导致相应部分 Fe^{3+} 变为 Fe^{2+}。实验证明，当 SiO_2 加入的重量百分比介于0.5与1.5之间时，能阻止晶粒生长；当超过此量时，反而会导致晶粒反常增长。

（2）PbO，Bi_2O_3 硼酸（H_3BO_3）。添加 SiO_2 能阻止晶粒生长，有利于矫顽力的提高。为了增加密度，提高 B_r，可添加PbO，Bi_2O_3 或硼酸（H_3BO_3）。当温度高于400℃时，H_3BO_3 生成 B_2O_3。B_2O_3 与 SiO_2 及SrO在一定的温度下将生成液相共晶体，从而促晶粒在较低的温度下均匀生长，增加密度，提高 B_r。H_3BO_3 的加入量一般为总重量的0.5%。

（3）硫酸盐类。添加少量的 MSO_4（M=Sr，Ba，Ca）对提高SrM的磁能积十分有效。有人认为，MSO_4 的作用是增加材料的致密性，改善取向度，因而增加BrO。也有人认为，MSO_4 的主要作用是细化晶粒，提高了矫顽力。事实证明，在MSO中加入总重量0.5%～1.0%的 MSO_4 可使 $(BH)_m$ 提高20%。

制备锶铁氧体的工艺与钙铁氧体基本相同，不再赘述。总之，制备高性能的锶铁氧体，需要正确的配方，合适的添加物，充分的预烧，正确的单畴颗粒制备，足够的取向磁场，合理的烧结工艺。作为例子，下面给出两种配方及相应的磁性能：

（1）在配方 $SrO\cdot5.6Fe_2O_3$ 中添加1.0ms% CaF_2，1.0ms% $SrSO_4$，0.5ms%PbO，经1200℃烧结后的磁性能为 $B_r=435$mT，$H_{cB}=163$kA/m，$H_{cJ}=166$kA/m，$(BH)_m=33.7$kJ/m^3。

（2）在配方 $0.2SrO\cdot0.8BaO\cdot5.95Fe_2O_3$ 中添加2.5ms% TeO_2，经1250℃烧结后磁性能为：$B_r=427$mT，$H_{cB}=185$kA/m，$(BH)_m=35$kJ/m^3。

以上是湿法磁场成型制备各向异性钡铁氧体的工艺。除此以外，还有干法磁场成型工艺，它是将未固化的粘合剂和钡铁氧体粉末所组成的软泥放入模具中，然后加磁场成型。待粘合剂凝固后，便成为产品。这个方法的缺点是，产品中的磁粉密度低，因而Br小，磁能积也小。其优点是，制作方法简单，尺寸准确，产品中磁性参数的变化范围小，并且可连续生产，成本低。干法磁场成型的关键是选择粘合剂。理想的粘合剂应具有双重性：既具有一定的润滑性和分散性，以便于单畴粒子在磁场中转动；同时又具有一定的粘结性，以保证产品具有良好的机械性能。可以作为这种产品粘合剂的材料有：①樟脑；②萘，又名洋樟脑；③硬质酸钙；④聚乙烯醇等。不同的粘合剂加入量不同。例如，樟脑的加入量约为1ms%，硬脂酸钙的加入量约为0.5%（质量分数），聚乙烯醇的加入量通常不超过0.2%（质量分数）。目前粘结各向异性钡铁氧体的磁性能为：$B_r=240$mT，$H_{cB}=170$kA/m，$H_{cJ}=215$kA/m，$(BH)_m=11.0$kJ/m^3。

表2.2-6和表2.2-7列出了我国烧结铁氧体永磁材料的牌号及有关性能标准；表2.2-8列出了国外高档铁氧体永磁体的主要性能；表2.2-9和表2.2-10列出了我国粘结铁氧体永磁材料的牌号及有关性能材料。

表 2.2-6 烧结永磁铁氧体材料参数及 SI 单位与 CGS 单位对照表

材料牌号	B_r		H_{cB}		H_{cJ}		$(BH)_{max}$		采用标准或对照国外牌号
	mT	kGs	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m³	MGOe	
Y8T	200～230	2.0～2.3	125～160	1.57～2.01	210～280	2.64～3.52	6.5～9.5	0.8～1.1	IEC 7/21
Y17	280～340	2.8～3.4	135～190	1.70～2.39	140～195	1.76～2.45	14.5～18.5	1.8～2.3	保留 SJ—285—Y15
Y22H	310～360	3.1～3.6	220～250	2.77～3.14	280～320	3.52～4.02	20.0～24.0	2.5～3.0	IEC—20/28
Y23	320～380	3.2～3.8	170～190	2.14～2.38	190～230	2.39～2.89	20.0～25.5	2.5～3.2	IEC—20/19
Y25	360～400	3.6～4.0	135～160	1.70～2.01	140～200	1.76～2.51	22.5～28.0	2.8～3.5	JIS—MPA320
Y25H	350～400	3.5～3.8	215～255	2.70～3.21	230～290	2.89～3.65	24.0～26.5	3.0～3.3	IEC—24/24
Y26H	360～390	3.6～3.9	220～250	2.77～3.14	225～255	2.83～3.21	23.0～28.0	2.9～3.5	TDK—FB3X
Y27H	370～400	3.7～4.0	205～240	2.58～3.02	220～255	2.77～3.21	25.0～29.0	3.1～3.7	IEC—25/22
Y28—1	380～410	3.8～4.1	130～175	1.63～2.20	135～185	1.70～2.33	25.0～30.0	3.1～3.8	IEC—25/14
Y28—2	370～400	3.7～4.0	175～210	2.20～2.64	180～220	2.26～2.77	26.0～30.0	3.3～3.8	IEC—26/18
Y30H—1	390～410	3.9～4.1	240～270	3.02～3.39	240～285	3.02～3.58	28.0～32.5	3.5～4.1	TDK—FB4B
Y30H—2	395～415	3.95～4.15	275～300	3.46～3.77	310～335	3.90～4.21	28.5～32.0	3.5～4.0	TDK—FB5H
Y32	400～420	4.0～4.2	160～190	2.01～2.38	160～195	2.01～2.45	30.0～33.5	3.8～4.2	TDK—FB4A
Y33	410～430	4.1～4.3	220～250	2.77～3.14	225～255	2.83～3.21	31.5～35.0	4.0～4.4	TDK—FB4X

注 材料牌号 第一部分 "Y"代表烧结永磁铁氧体材料，"YN"代表粘结永磁铁氧体材料，采自汉语拼音第一字母；
第二部分 阿拉伯数字，代表材料 $(BH)_{max}$ 值以 kJ/m³ 为单位时的典型整数值（标称值）；
第三部分 T代表同性是"同"字汉语拼音第一字母；B代表高 B_r 材料；H代表高 H_{cB}，高 H_{cJ} 材料。

试验方法：永磁铁氧体材料的主要磁性能的试验方法按 GB 3217 规定。

表 2.2-7 烧结永磁铁氧体材料参考性能

项目	符号	单位	数值	备注
相对回复磁导率	μ_{rec}		1.05～1.3	
居里点	T_c	℃	450	
剩磁温度系数	$\alpha(B_r)$	℃⁻¹	−0.2%	0～100℃
磁化强度矫顽力的温度系数		℃⁻¹	0.2%～0.5%	0～100℃
密度	ρ	g/cm³	4.5～5.1	
电阻率	ρ	Ω·cm	$>10^5$	
线膨胀系数	α_R	℃⁻¹	$7\sim15\times10^{-6}$	
硬度	H_V		480～580	

表 2.2-8 国外高档永磁铁氧体的性能

厂家	牌号或等级	B_r		H_{cB}		H_{cJ}		$(BH)_{max}$	
		T	G_S	kA/m	Oe	kA/m	Oe	kJ/m³	MGOe
T	FB6H	0.40	4000	302.5	3800	358.3	4500	30.3	3.8
D	FB6B	0.42	4200	302	3800	318	4000	33.4	4.2
K	FB6N	0.44	4400	259	3250	263	3300	36.6	4.6
日立公司	YBM—6BB	0.43	4300	245	3077	255	3202	34.5	4.33
	YBM—6BD	0.42	4200	275	3453	285	3579	33.5	4.21
	YBM—6BE	0.41	4100	295	3704	320	4018	32.0	4.02
	YBM—6BF	0.40	4000	290	3642	355	4533	30.0	3.77
韩国双龙	SSM—400H	0.40～0.42	4000～4200	387～310	3600～3900	310～334	3900～4200	30.2～33.4	3.8～4.2
	SSM—430B	0.42～0.44	4200～4400	183～207	2300～2600	191～215	2400～2700	32.6～35.0	4.1～4.4
	SSM—460	0.43～0.45	4300～4500	207～231	2600～2900	215～239	2700～3000	34.2～36.6	4.3～4.6

表 2.2-9 粘结永磁铁氧体材料参数及 SI 单位与 CGS 单位对照表

材料牌号	B_r		H_{cB}		H_{cJ}		$(BH)_{max}$		ρ	对照国外牌号
	mT	kGs	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m³	MGOe	g/cm³	
YN1T	63～83	0.63～0.83	50～70	0.63～0.88	175～210	2.20～2.64	0.8～1.2	0.10～0.15	2.3	IEC—1/18P
YN4T	135～155	1.35～1.55	85～105	1.07～1.32	175～210	2.20～2.64	3.2～4.0	0.40～0.50	3.8	IEC—3/18P
YN10	220～240	2.20～2.40	145～165	1.82～2.07	190～225	2.39～2.83	9.0～10.6	1.13～1.33	3.4	IEC—9/19P
YN11	230～350	2.30～2.50	160～180	2.01～2.26	225～260	2.83～3.27	10.0～11.6	1.3～1.5	3.5	IEC—10/22P

表 2.2-10 粘结永磁铁氧体材料的附加磁特性与物理特性

项 目	符 号	单 位	数 值	
相对回复磁导率	μ_{rec}		1.05～1.3	
电阻率	ρ	Ω·cm	10	
线膨胀系数		℃$^{-1}$	18×10^{-6}	4～120℃
硬度	SHORED		30～45	

注 材料牌号与试验方法同烧结永磁铁氧体。

3.4 铁氧体永磁材料的性能特点及应用

和铸造金属永磁材料相比，铁氧体永磁在性能方面具有以下特点：

(1) 铁氧体永磁材料的磁矩来自不同次晶格金属离子的磁矩差，因而饱和磁感应强度低。Ba 铁氧体和 Sr-Ca 铁氧体的饱和磁感应强度都尚不及铝镍钴永磁材料的一半，不能对外产生太强的磁场。这是这类材料的一个明显缺陷。

(2) 铁氧体永磁材料属于单轴晶体，并且具有很大的磁晶各向异性常数，因而内禀矫顽力高。其中，Sr-Ca 铁氧体的内禀矫顽力更高一些。这种材料适合用于永磁体的退磁因子较大的场合。

(3) 磁性能随温度变化较大，剩磁 B_r 的温度系数约为 −0.19%/℃，内禀矫顽力 H_{cJ} 随温度的下降以 0.2%/℃～0.5%/℃的速率减少。因此这种材料不适宜在工作温度变化较大而又要求磁性能变化很小的场合（如仪表中）使用。

(4) 铁氧体永磁材料的电阻率特别高，可在电磁场的环境中应用。

(5) 铁氧体永磁体的原料极为丰富，且对原料的纯度要求不高，价格便宜，制备工艺相对比较简单，从而使铁氧体永磁成为目前永磁材料中用量最大、产量最高、价格最低的产品。

近年来，铁氧体永磁材料的年产量大约在 5×10^5 t 以上，其中我国的产量居世界首位。

铁氧体永磁材料目前被大量地用于电机、扬声器、电真空器件、微波炉、磁力装置、磁疗器械等方面。今后，铁氧体永磁材料在汽车工业中的应用将是一个重要方面，主要用于各种永磁电机。越是豪华轿车，所需要的永磁电机就越多。随着汽车工业的发展，对铁氧体永磁的需求量还将进一步增大。

4 烧结稀土永磁材料

稀土永磁材料是以 4f 稀土元素 R（Sm、Nd、Pr 等）和 3d 过渡族金属 TM（Co、Fe 等）等组成的化合物为基体的一类永磁材料，是近 50 年来发展起来的新型永磁材料。3d 过渡族元素 Fe、Co、Ni 等磁性原子具有强的交换作用、高的居里温度和饱和磁化强度，但各向异性场较低，而 4f 稀土族元素磁各向异性较高，但原子间的交换作用弱，居里温度偏低，二者的结合形成的化合物可以实现较高的饱和磁化强度和高各向异性。大量的实验证明，以 4f 和 3d 元素构成的化合物作为基体所合成的永磁材料通常拥有较高的最大磁能积、剩磁、矫顽力等技术磁参量。

稀土永磁合金可以分为 R－Co 系和 R－Fe 系永磁体，R－Co 系包括 1∶5 型 $SmCo_5$ 磁体和 2∶17 型 Sm_2（Co，Fe，Cu，Zr）$_{17}$ 型磁体；R－Fe 系主要是指 $R_2Fe_{14}B$ 型的钕铁硼磁体。通常把 $(BH)_{max}\approx160kJ/m^3$ 的 1∶5 型 $SmCo_5$ 磁体称为第一代稀土永磁材料；$(BH)_{max}\approx200\sim240kJ/m^3$ 的 2∶17型 Sm_2TM_{17} 磁体称为第二代稀土永磁材料；$(BH)_{max}\approx240\sim460kJ/m^3$ 的 NdFeB 磁体称为第三代稀土永磁材料。迄今为止，NdFeB 永磁材料仍然以其他材料不可比拟的永磁性能位居永磁材料的应用发展之首。在当前的研究领域还存在对三代稀土永磁材料的力学性能、耐腐蚀性能、温度特性的研究，以及寻找新型结构和成分的磁体，以进一步改进和提高稀土永磁材料的磁性能。

4.1 $SmCo_5$ 稀土永磁材料

第一代稀土永磁合金的发现始于 20 世纪 50 年代，1959 年 Nesbitt 等人首先发现了 $GdCo_5$ 合金较强的磁晶各向异性，1967 年 Strnat 等人又发现了高磁化强度、高居里温度及高单轴磁晶各向异性的 YCo_5 及 $SmCo_5$ 永磁合金。1968 年，Buschow 采用等静压工艺制备出相对密度高达 95% 的 $SmCo_5$ 永磁材料，其磁性能为 $J_r=0.84T$，$\mu_0H_c=1.58T$，$(BH)_{max}=147kJ/m^3$，最大磁能积可达 $199kJ/m^3$，标志着第一代稀土永磁材料进入适用阶段。接下来的 20 世纪 70 年代，$SmCo_5$ 系永磁材料开始商品化，这样以 $SmCo_5$ 为代表的永磁合金便形成了第一代稀土永磁材料。

4.1.1 1∶5 型化合物晶体结构与内禀性能

第一代稀土永磁材料基体成分主要代表是 $SmCo_5$ 化合物，属于低对称 $CaCu_5$ 型六角晶系，空间群为 Pb/mmm，如图 2.2-4 所示，稀土占据 a 晶位，Co 占据 c 晶位和 g 晶位。晶格常数 $a=0.500\ 4nm$，$c=0.397\ 1nm$。这种结构可以认为是 2 个原子层沿［0001］轴方向交替堆垛而成。其中一个原子层由稀土原子和 Co 原子组成（A 层），另外一层由 Co 原子组成（B 层），这种 $CaCu_5$ 型结构即是由 A 层和 B 层的堆垛，即 ABABAB 等组成。

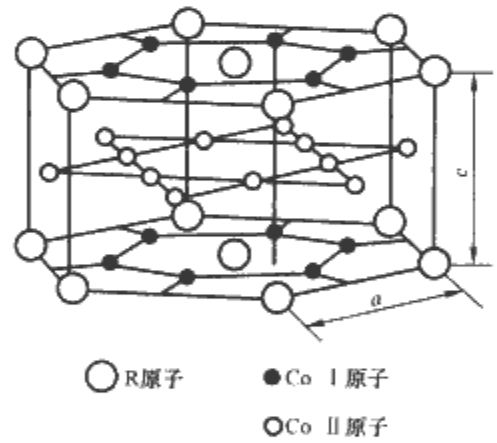


图 2.2-4 $CaCu_5$ 型晶体结构图

在第一代稀土永磁体 RT_5 中，为何选取 Sm 和 Co 来合成永磁化合物，原因主要是 RT_5 结构可以使六角 Co 的磁相变温度稳定在 700～1000K 范围内；对于稀土而言，选取 Gd，其磁矩会和 Co 反平行耦合，而 Y 和 La 不具有 4f 电子，Nd 和 Co 形成的化合物是面各向异性，Ce 的 4f 电子不稳定，因此 R 仅局限于取轻稀土元素 Pr、Sm，图 2.2-5 和图 2.2-6 给出了 R－T 化合物的基础磁性；表 2.2-11 给出了 RCo_5 金属间化合物的内禀磁性。由此可以看出，$SmCo_5$ 化合物内禀磁特性最佳。

表 2.2-11 RCo_5 金属间化合物的内禀磁性

金属间化合物	YCo_5	$CeCo_5$	$PrCo_5$	$SmCo_5$
饱和磁极化强度 J_s(T)	1.060	0.870	1.120	0.950
各向异性常数 k(MJ/m^3)	5.5	~7.3	−8.0	~9.5
居里温度 T_c(K)	973	737	912	1020

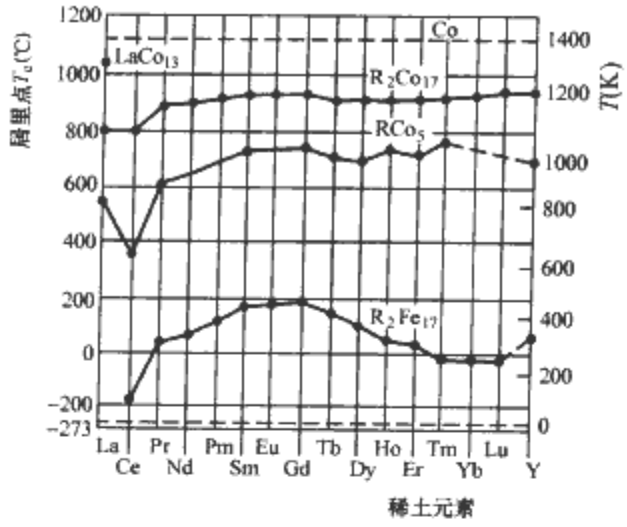


图 2.2-5 R—T 系金属间化合物的居里点

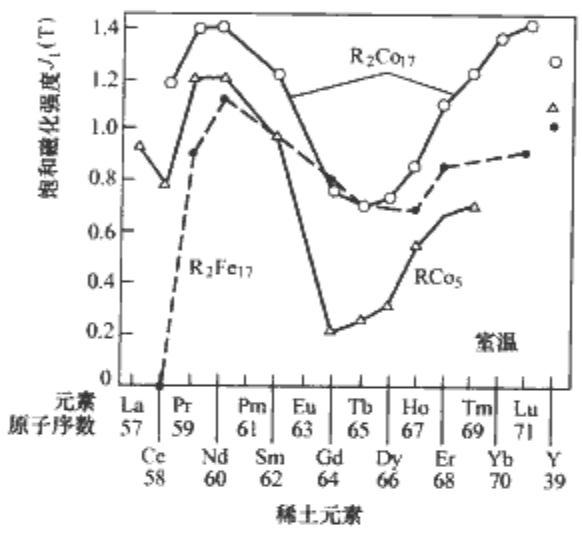


图 2.2-6 R—T 系金属间化合物的室温饱和磁化强度

4.1.2 1：5 型 RCo_5 永磁材料的合金分类

根据表 2.2-11，RCo_5 型化合物中内禀性能最好的是 $SmCo_5$，因此要提高第一代稀土永磁材料的磁性能，就需要在材料中尽可能多的形成 $SmCo_5$ 相。目前 RCo_5 系第一代稀土永磁材料大致可以分为以下几种：

$SmCo_5$ 系永磁合金。考虑制备工艺过程中稀土元素的挥发等因素，单纯的 $SmCo_5$ 合金一般在 Sm 原子百分比为 16.72%～16.94%时，拥有最佳磁性能。但是为了满足实际使用情况的需要以及调整其他方面的性能或者考虑到实际生产的需要，合金可能还有其他稀土元素，一般来讲，Sm 含量应至少占稀土总量的 70%，其他 0～30%是较为便宜的稀土金属，这类磁体的特点是具有极高的内禀矫顽力，具有较高的温度特性。

（Sm，Pr）Co_5 系永磁合金。此类合金是用部分 Pr 取代 Sm，主要目的是提高合金的最大磁能积。$PrCo_5$ 的饱和磁化强度要比 $SmCo_5$ 高，由其产生的剩磁能和磁能积要高于 $SmCo_5$，但是 Pr 的加入会降低各向异性，从而导致材料的矫顽力降低。这类合金是综合了 $SmCo_5$ 和 $PrCo_5$ 的优点。主要成分一般是 Pr 含量占稀土总量的 20%以下，Sm 为 80%以上。

$MMCo_5$ 永磁合金。由于稀土 Sm 和 Pr 价格比较贵，混合稀土金属 MM，比前两者便宜的多，因而发展了 $MMCo_5$ 或（Sm，MM）Co_5 永磁材料，这类磁体的最大磁能积、矫顽力、剩磁均小于 $SmCo_5$ 合金，且居里温度小于 500℃，极易氧化。一般来讲，Sm 的含量占稀土总量的 15%～20%，MM 占 80%～85%。

（Sm，HR）Co_5 永磁合金。此类合金是在 $SmCo_5$ 合金的基础上添加 Gd、Dy 等重稀土元素，取代部分 Sm，主要目的在于改善磁体温度稳定性。调整 Sm～HR 的比例可以实现接近 0 的剩磁温度系数。此类磁体主要用于小体积微波管中、测量仪器仪表的加速度表以及自动导航定位陀螺仪中，但是由于其含有重稀土元素 Gd、Dy 等，因此造价比较贵。

Sm（Co，Cu，Fe）$_{5\sim7}$ 永磁合金。此类合金的特点是在 $SmCo_5$ 合金的基础上用 Fe 和 Cu 部分取代 Co，最大磁能积可以与纯 $SmCo_5$ 合金相比，但矫顽力稍低一些，低矫顽力合金易于磁化，所需的磁化场低一些可以满足一定实际情况的需要。另外还有 Ce（Co，Cu，Fe）$_5$ 系合金，由于其不包含 Sm，因此造价很低。调整不同成分的 Sm 和 Ce，可以得到不同性能的（Sm，Ce）（Co，Cu，Fe）$_5$ 合金，从而实现不同需要的稀土永磁体。

4.1.3 1：5 型 RCo_5 永磁材料的主要磁性能

1：5 型 $SmCo_5$ 金属间化合物具有高的磁晶各向异性，第一级磁晶各向异性常数 k_1 高达 19×10^3 kJ/m^3，饱和磁极化强度 J_s 约 0.95T，理论磁能积可达 244kJ/m^3，而实际生产的 1：5 型 $SmCo_5$ 稀土永磁材料其主要磁性能低于理论值，表 2.2-12 列出了部分 1：5 型 RCo_5 永磁材料的磁性能。图 2.2-7 列出了部分 1：5 型 RCo_5 永磁材料典型的退磁曲线。

$SmCo_5$ 永磁体居里温度约为 740℃，它可以在－50～150℃温度范围内工作，因此，其在现在科技工业中具有广泛的应用，是一种较为理想的永磁体，但是由于其包含较多的战略金属 Co 和储藏稀少的稀土 Sm，其发展又受到资源与价格的限制。

表 2.2-12 部分 1：5 型 RCo_5 永磁材料的磁性能

磁体类型	制造工艺	剩磁 B_r（T）	矫顽力		最大磁能积 $(BH)_m$(kJ/m^3)
			H_{cB}(kA/m)	H_{cM}(kA/m)	
$SmCo_5$	烧结、粘结	0.6～0.95	310～700	540～1900	55～180
（Sm，Pr）Co_5	烧结	0.8～1.1	497～680	590～1300	150～210
$MMCo_5$	烧结	0.6～0.8	500～610	210～600	80～140
（Sm，MM）Co_5	烧结	0.9	480～670		140～180
（Sm，HR）Co_5	烧结	0.5～1	500～760	1100～3100	60～190
（Sm，Ce）（Co，Cu，Fe）$_5$	烧结	0.45～0.78	270～360		34～97

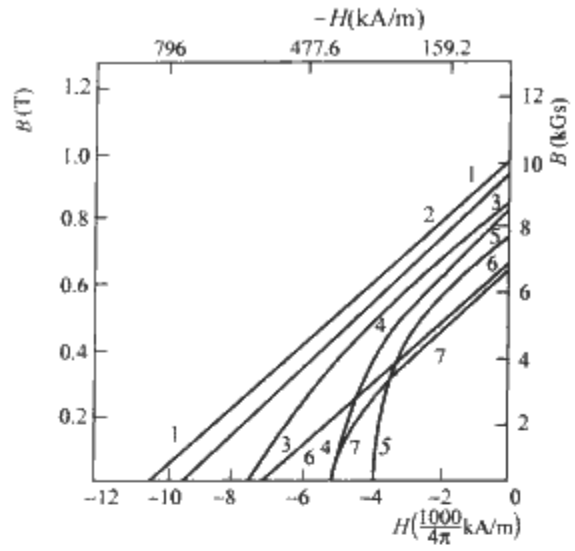


图 2.2-7 部分 1：5 型 RCo_5 永磁材料典型的退磁曲线

1—Sm-Pr-Co；2—Sm-Co；3—Sm-MM-Co；4—Pr-Co；5—Sm-Ce-Co；6—Sm-La-Co；7—Sm-Ce-Co-Cu-Fe

4.1.4 1：5 型 RCo_5 永磁材料的烧结工艺对磁性能的影响

稀土永磁 RCo_5 材料的制备采用粉末冶金工艺，其后期的烧结和退火工艺对材料的性能具有非常重要的影响，主要体现在烧结温度、烧结时间、升温速率、降温速率、烧结步骤、回火温度、回火时间等对材料性能的影响。表 2.2-13 为部分烧结工艺参数对 $SmCo_5$ 永磁性能的影响。表 2.2-14 为烧结温度对 $SmCo_5$ 永磁合金磁性能的影响。从中可以看出材料磁性能对烧结工艺和烧结温度非常敏感。

表 2.2-13 烧结工艺参数对 37.2%Sm+62.8%Co 的 $SmCo_5$ 永磁合金磁性能的影响

烧结和热处理工艺	磁性能			
	B_r (T)	H_{cB} (kA/m)	H_{cM} (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kA/m³)
1120℃，1h；150℃/min 冷却至室温	0.94	374.1	636.8	91.5
1120℃，1h；0.7℃/min 冷却至 900℃再以 150℃/min 冷却至室温	0.93	557.2	1273.6	127.4
1120℃，1h；0.7℃/min 冷却至 900℃，并在 900℃处理 10h	0.95	636.8	1592	163.2
1120℃，1h；0.7℃/min 冷却至 900℃再以 50℃/min 冷却至室温	0.96	533.3	1194	123.4
1120℃，1h；3℃/min 冷却至 900℃再以 150℃/min 冷却至室温	0.94	517.4	1114.4	119.4

表 2.2-14 烧结温度对 36.8ms%Sm+63.2ms%Co 的 $SmCo_5$ 永磁合金磁性能的影响

烧结温度 (℃)	剩磁 B_r (T)	矫顽力 H_{cB} (kA/m)	最大磁能积 $(BH)_{max}$ (kA/m³)
1120	0.790	597	120.2
1130	0.795	620.8	124.9
1140	0.820	624.9	129.7
1150	0.910	684.6	159.2
1160	0.905	581.0	143.3

除此之外，在回火过程中，1：5 型 $SmCo_5$ 永磁体在 750 ℃左右回火时，出现矫顽力的“回火效应”，即在 500～800℃温度范围内回火或对此温度区间缓慢冷却，其矫顽力大幅度的降低，再经 900～950℃加热并快冷时，矫顽力又可部分回复或者全部回复，如图 2.2-8 所示。这一现象涉及到合金组织相转变和矫顽力的机理问题，因此被人们所广泛关注。目前一般存在如下几种解释：

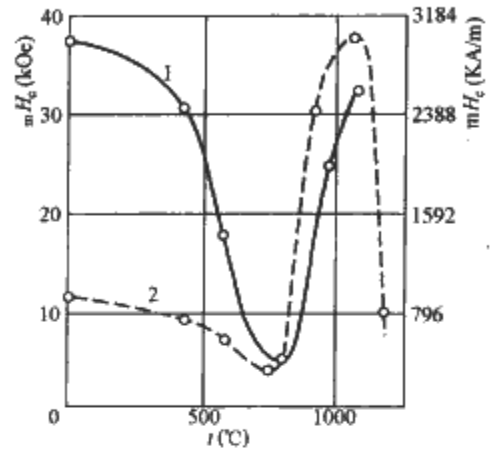


图 2.2-8 $SmCo_5$ 合金矫顽力随烧结温度和回火温度的变化

(1) $SmCo_5$ 在 750 ℃下共析分解为 Sm_2Co_7 和 $Sm2Co_{17}$ 两相，导致矫顽力降低。

(2) $SmCo_5$ 在 700℃左右处理，晶界富集氧到一定程度，形成 Sm_2O_3，导致矫顽力下降。

(3) 在 Sm_2Co_{17} 相和主相 $SmCo_5$ 间存在成分过渡区，形成反磁化核中心。

(4) 析出的 Sm_2Co_{17} 相中存在某些缺陷区，导致很低的磁晶各向异性，从而形成反磁化形核中心，降低矫顽力。

(5) $SmCo_5$ 在 750℃和 950℃交替热处理时，由于 $SmCo_5$ 均匀区较窄，必然在合金内部形成 Sm 原子与 Co 原子等的不均匀固溶体，并且在 750℃时呈现最大磁不可逆损失，导致富集区各向异性降低，致使矫顽力下降。

4.1.5 1：5 型 RCo_5 永磁材料的微观组织结构

1：5 型永磁合金中主相 $SmCo_5$ 化合物良好的内禀性能是此类材料可能实现良好磁性能的前提条件，但材料合成过程中的不同工艺条件则直接影响了材料宏观性能的好坏。一般来说，不同的工艺条件所制得的材料的微结构是不同的，不同的温度下微观组织形貌也是不同的。这主要原因在于不同工艺条件及温度下的相转变不同。

图 2.2-9 是室温下采用 JEM—1000 超高压电子显微镜观察到的 $SmCo_5$ 合金的显微结构(样品成分 Sm 质量百分数约 37.66%)。在室温条件下，电子显微相的大部分区域没有沉淀析出，可以观察到少量缺陷，从其选区电子衍射花样及指标化来看，确定为 $SmCo_5$ 化合物。但随着温度升高，在 $SmCo_5$ 母体中析出 Sm_2Co_{17} 相，在不同温度阶段，新生相的生核速度不一样，当温度升至 650℃左右时，Sm_2Co_{17} 相发育成完整的六角形状，其条状显微结构明显。

图 2.2-10 为采用 Kerr 磁光效应方法观察的 $SmCo_5$ 永磁合金的磁畴结构，图 2.2-10(a)所示的照片为样品处于热退磁状态时，垂直易磁化方向轴方向的平面磁畴花纹，从中可以看出正反磁畴体积相等，无磁性。图 2.2-10(b)为样品经过 3.0T 外场磁化后的照片，从中可以看出正向畴体积明显减少，反向畴宽度变大，呈现迷宫状花纹。

4.1.6 1：5 型 $SmCo_5$ 永磁材料的矫顽力机理

$SmCo_5$ 永磁合金理论矫顽力可达 3.18×10^4 kA/m，然

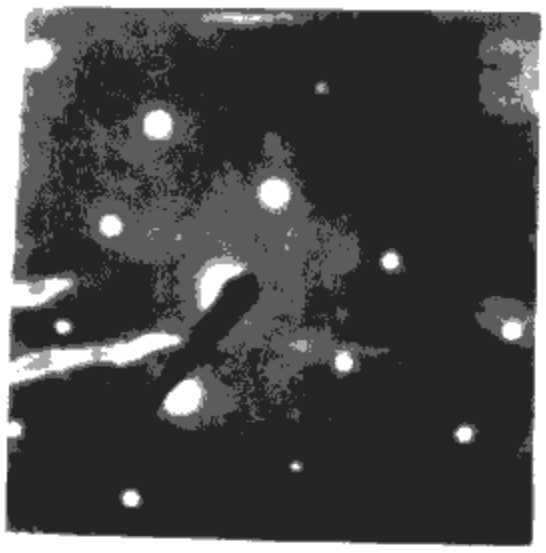
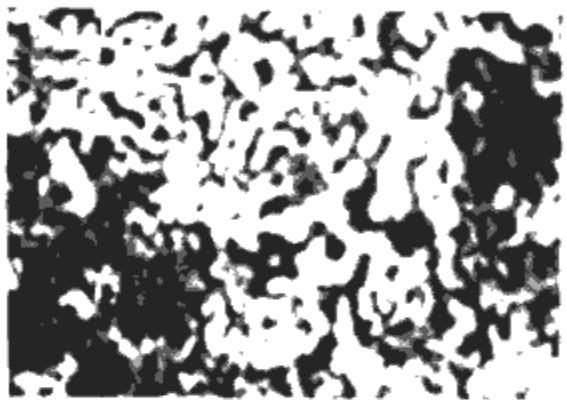
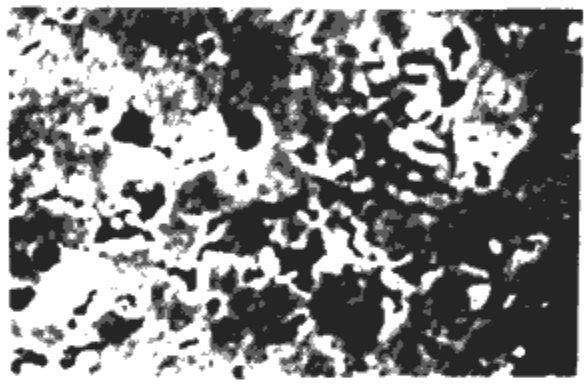


图 2.2-9 $SmCo_5$ 永磁合金室温下的显微组织



(a)



(b)

图 2.2-10 热退磁状态下磁畴结构(600×)
(a)垂直易磁化方向轴方向的平面磁畴花纹；
(b)经 3.0T 磁场磁化后的磁畴结构

而实际样品的数值仅为其理论值的十分之一左右。实验证明，$SmCo_5$ 的单畴临界尺寸约为 0.3～1.6μm，实际获得最大矫顽力时对应的 $SmCo_5$ 颗粒尺寸约 5～20μm，因此，1∶5 型$SmCo_5$ 永磁材料的矫顽力不符合单畴理论。目前一般来看，多数人认为 $SmCo_5$ 永磁材料的矫顽力由反磁化畴的形核长大的临界场所决定。

Kronmüler 等人首先采用微磁学理论推算了 $SmCo_5$ 永磁材料在沉淀相形成反磁化畴核的形核场 H_A，他把沉淀相当作孤立的铁磁晶粒来处理，并假设片状的沉淀相的表面与自身易磁化轴垂直，得到：

$$H_{cM} = \frac{2K_p}{M_p} - 2\pi M_p + \frac{2A_p\pi^2}{M_p D^2} \qquad (2.2\text{-}4)$$

式中：p 代表沉淀相的物理量；K_p、A_p、M_p 分别为沉淀相的磁晶各向异性常数、交换积分和饱和磁化强度，D 为沉淀相的厚度。

但是由此推算的理论结果与实验间存在一定的差距，因此进一步假设沉淀相与母相间的 K 遵循高斯函数分布规律，并且沉淀相的厚度很小时，形核场的公式可近似由下式表达：

$$H_n = \frac{2K_1}{\pi M_p}\frac{\delta_B}{r_0} \qquad (2.2\text{-}5)$$

带入相关参数后可以与实验数值符合的较好。从而可以判断 $SmCo_5$ 永磁材料由反向畴的形核场来决定合金矫顽力。

4.1.7 1∶5 型 RCo_5 永磁材料的温度特性及其他性能

1∶5 型 RCo_5 永磁材料的工程应用除对材料磁性能提出要求外，还对材料的其他特性比如温度特性、化学稳定性、力学特性、热学和电学特性等提出要求。

4.1.7.1 温度稳定性

所谓温度稳定性是指磁性材料的磁性能随温度的变化，一般采用磁通总损失 h_T、磁通不可逆损失 h_{irr}、磁通可逆损失 h_{rev}以及可逆温度系数 α 等几个参量来描述永磁材料的温度稳定性。比较常用的为温度系数 α_{Br} 和 α_{Hcj}，分别表示材料的剩磁和矫顽力随温度的变化规律，其表达式分别为：

$$\alpha_{Br} = \frac{B(T) - B(T_0)}{B(T_0)(T - T_0)} \times 100\% \qquad (2.2\text{-}6)$$

$$\alpha_{Hcj} = \frac{H_{cj}(T) - H_{cj}(T_0)}{H_{cj}(T)(T - T_0)} \times 100\% \qquad (2.2\text{-}7)$$

表 2.2-15 给出了具有代表性的两种成分的 $SmCo_5$ 永磁合金在(－196～250)℃温度内的可逆温度系数 α_{Br}、α_{Hcj} 和 $\alpha_{(BH)max}$数值。

表 2.2-15 两种不同成分的烧结 $SmCo_5$ 永磁材料的可逆温度系数值

成 分	磁参量	可逆温度系数数值 α(%/℃)					
		－196℃	－60℃	100℃	150℃	200℃	250℃
	B_r (T)	0.022	0.044	0.041	0.039	0.049	0.048
36.9%① Sm	H_{cB} (kA/m)	0.041	0.076	0.069	0.083	0.074	0.098
63.1%① Co	H_{cB} (kA/m)	0.198	0.250	0.200	0.220	0.022	0.211
	$(BH)_{max}$ (kJ/m³)	0.046	0.059	0.063	0.076	0.106	0.101
	B_r (T)	0.024	0.031	0.011	0.063	0.045	0.047
37.5%① Sm	H_{cB} (kA/m)	0.018	0.031	0.105	0.084	0.068	0.058
62.5%① Co	H_{cB} (kA/m)	0.183	0.238	0.194	0.238	0.170	0.211
	$(BH)_{max}$ (kJ/m³)	0.047	0.058	0.207	0.160	0.130	0.111

① 质量分数。

图 2.2-11 为不同种类的 $SmCo_5$ 永磁合金在－196～250℃温度下的退磁曲线，按照从室温到高温，再回到室温再经低温回到室温的测量过程，得到可重复退磁曲线，表明在所测量的温度范围内没有发生不可逆损失。

4.1.7.2 抗氧化行为

图 2.2-12 是采用热重分析方法测得的 $SmCo_5$、CeM-MCo_5 和 $PrCo_5$ 合金在 120℃ 干燥空气下的氧化速度曲线。从中可以看出，添加 Pr 的合金最易氧化，其次是含 Ce 等元素的合金，$SmCo_5$ 最稳定。

4.1.7.3 力学特性

表 2.2-16 给出了 $SmCo_5$ 合金的抗弯强度数值。从中可以看出等静压样品不同方向的力学性能差别小，而垂直模压

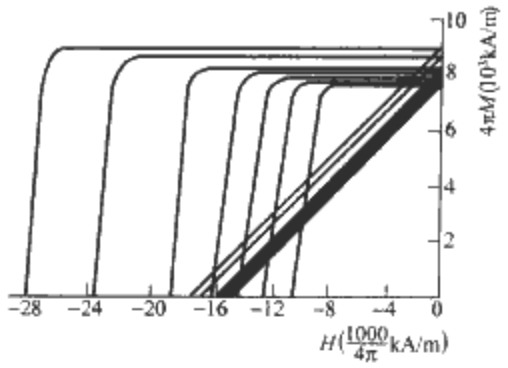


图 2.2-11　$SmCo_5$ 永磁合金在 −196～250℃ 温度下的退磁曲线

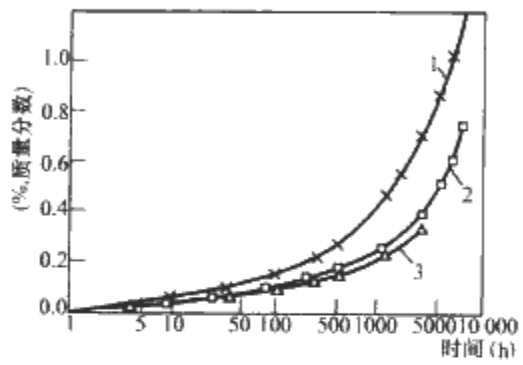


图 2.2-12　$SmCo_5$、$CeMMCo_5$ 和 $PrCo_5$ 合金在 120℃ 干燥空气下的氧化速度曲线

1—$PrCo_5$；2—$CeMMCo_5$；3—$SmCo_5$

样品的不同方向抗弯强度差别大。

表 2.2-16　$SmCo_5$ 永磁材料的抗弯曲强度

样品	实验温度	磁化强度方向		
		平行磁化强度方向	0℃垂直磁化强度方向	90℃垂直磁化强度方向
		MPa(标准偏差)	MPa(标准偏差)	MPa(标准偏差)
等静压样品	−60	105.6(17.7)	106.5(10.4)	93.1(7.7)
	23	120.4(20.5)	100.0(6.6)	96.6(13.4)
	100	108.5(11.4)	100.3(12.8)	85.6(8.4)
	200	113.6(10.9)	98.3(3.2)	73.3(12.0)
垂直模压样品	−60	83.1(7.2)	61.0(25)	68.4(27.2)
	23	82.4(11.8)	82.5(26.6)	79.7(28.2)
	100	92.3(2.7)	106.6(31.8)	80.5(34.9)
	200	72.0(24.8)	117.5(8.70)	81.4(23.7)

4.1.7.4　电学和热学性能

表 2.2-17 和表 2.2-18 分别给出了 $SmCo_5$ 合金的电阻率、电阻温度系数和相关热学性能。

表 2.2-17　$SmCo_5$ 永磁材料的抗弯曲强度

样品	测量方向	电阻率(μΩ/cm)					电阻温度系数
		−60℃	0℃	25℃	100℃	200℃	[μΩ/(cm·℃)]
垂直模压样品	垂直于磁化方向	43	51	55	67	83	0.154
	平行于磁化方向	35	42	46	56	71	0.136
等静压样品	垂直于磁化方向	44	53	57	69	85	0.157
	平行于磁化方向	40	47	51	61	76	0.138

表 2.2-18　$SmCo_5$ 永磁材料的抗弯曲强度

热学参量		样品	
		垂直模压样品	等静压样品
热膨胀系数(℃$^{-1}$)	垂直磁化强度方向	12×10^{-6}	13×10^{-6}
	平行磁化强度方向	6×10^{-6}	7×10^{-6}
导热性 α(cm^2/s)		0.041	0.045
比热容 c_p[J/(kg·℃)]		5.4×10^{-4}	5.2×10^{-4}
密度 ρ(g/cm^3)		8.47	8.30
热传导 K[W/(m·℃)]		1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}

4.2　Sm_2Co_{17}型稀土永磁材料

稀土金属与 Co、Fe、Ni 等过渡金属可以形成一系列的金属间化合物，除了 $CaCu_5$ 型结构的 1∶15 型化合物之外，研究中人们还发现 RE_2Co_{17}、RE_2Fe_{17} 系列化合物。在所有 2∶17型化合物中，RE_2Co_{17} 基系列的化合物较 $RECo_5$ 系化合物具有更高的饱和磁化强度，考虑到实际生产中 $RECo_5$ 永磁材料使用价格昂贵的稀土较多，造价偏高，人们逐渐将研究的中心转移到以 Sm 和 Co 为主要成分的 2∶17 型结构稀土永磁化合物上。通过添加 Cu、Zr、Fe 等少量元素以及改进工艺方法，在保证材料高饱和磁化强度的基础上，又进一步提高了矫顽力，使得 Sm_2Co_{17} 型化合物的应用成为可能。上世纪 70 年代中后期，Sm_2Co_{17} 烧结稀土永磁材料进一步发展成熟并广泛应用于市场，形成了第二代稀土永磁材料。

4.2.1　2∶17 型化合物晶体结构与内禀性能

稀土和 Co、Fe 所形成的 2∶17 型化合物在高温状态下具有 Th_2Ni_{17} 型晶体结构，在低温下则转变成 Th_2Zn_{17} 型结构。二者为同素异构体，具有相似的结构，图 2.2-13 和图 2.2-14 分别给出了 Th_2Ni_{17} 和 Th_2Zn_{17} 的晶体结构图。Th_2Ni_{17} 型化合物属于六方晶系，空间群为 P63/mmc，稀土占据 b 和 d 晶位，Co 占据 g、k、f 和 j 晶位。Th_2Zn_{17} 型化合物属于菱方晶系，空间群为 R3m，稀土占据 c 晶位，Co 或 Fe 占据 d、f、h 和 c 晶位。

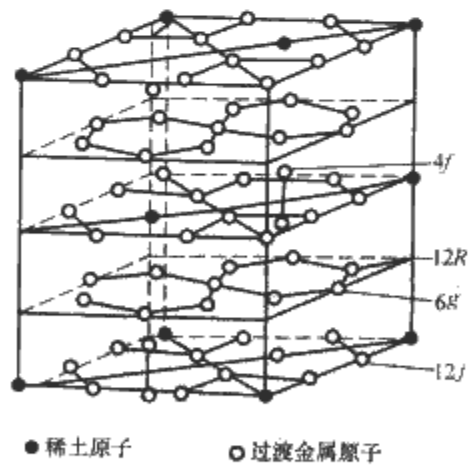


图 2.2-13　Th_2Ni_{17} 型晶体结构图

4.2.2　2∶17 型 Sm_2Co_{17} 系永磁材料的合金分类

根据成分的不同，Sm_2Co_{17} 系永磁材料大致可以分为如下几个系列。

4.2.2.1　Sm—Co—Cu 系永磁材料

Sm—Co—Cu 三元合金主要成分可以表达为 $Sm(Co_{1-x}Cu_x)_z$，其中小角标代表原子数，$5<z\leqslant8.5$。当 $5<z\leqslant5.6$ 时，合金的基体相为 $Sm(CoCu)_5$ 相，具有 $CaCu_5$ 型结构，析出相为 $Sm_2(CoCu)_{17}$，具有 2∶17 型结构。对

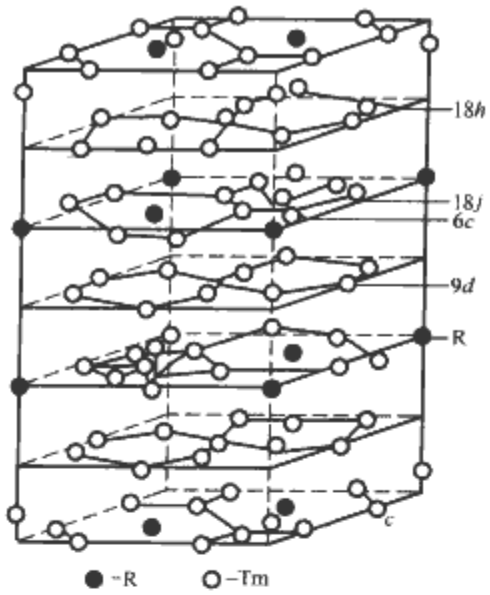


图 2.2-14 Th_2Zn_{17}型晶体结构图

于具体成分的 Sm $(Co_{0.65}Cu_{0.35})_{5.6}$合金，经过 1180℃退火 3h 后，2∶17 相基本转化为 1∶5 相，并且其矫顽力随回火温度的变化呈现双峰。当 $6.9<z\leqslant7$ 时，合金的基体相为 $Sm_2(CoCu)_{17}$相，具有 2∶17 型结构，析出相为 $Sm(CoCu)_5$ 相，具有 $CaCu_5$ 型结构，在经 1200℃退火以及进一步时效处理时，合金内部相的结构随之变化，并最终形成复相合金。在 z 取值为 7.8 时，铸态合金 Sm $(Co_{0.87}Cu_{0.13})_{7.8}$呈现软磁特征，经固溶处理和 800℃退火 4h，矫顽力呈现最大值，合金由基体相 2∶17 相和棒状 1∶5析出相组成，1∶5 相的钉扎作用决定了合金的矫顽力。

4.2.2.2 Sm—Co—Cu—Fe 系永磁材料

在 Sm—Co—Cu 系基础上，用 Fe 部分取代 Co 带来了两个突出变化：

(1) Sm $(Co_{1-x-y}CuxFey)_z$ 合金的饱和磁化强度随 Fe 含量的增加迅速增加，但 Fe 的含量过高又会降低矫顽力。当合金中存在 Fe—Co 相析出时，矫顽力会急剧降低。

(2) 在 Sm $(Co_{1-x-y}Cu_xFe_y)_{7.0}$合金中，少量的 Fe 取代 Co，其磁性大大改善，例如采用 1200℃烧结，850℃时效处理 30min，Sm$(Co_{0.8}Cu_{0.15}Fe_{0.05})_{7.0}$合金的剩磁可达 0.915～0.944，磁感矫顽力可达 517.4～465.16kA/m，磁能积可达 158.4～168.7kJ/m³。

(3) Sm—Co—Cu—Fe—M (M＝Zr、Ti、Hf、Ni 等)系永磁材料。在实际工业生产中得到广泛应用的 2∶17 型合金主要是 Sm—Co—Cu—Fe—M 系永磁材料。由于 M 种类不同，主要包括 Zr、Ti、Hf、Ni 等金属，又形成了多种特性的 2∶17 型永磁材料，其中以 Sm—Co—Cu—Fe—Zr 合金的永磁性能最好，表 2.2-19 列出了此类合金的成分与磁性能。从中可以看出，此类合金的成分可以采用 Sm $(Co_{1-u-v-w}Fe_uCu_vM_w)_z$ 进行统一表达，各角表代表原子数之比，z 的数值在 7.0～8.3 之间，u 的数值在 0.15～0.30 之间，v 的数值在 0.05～0.08 之间，w 的数值在 0.01～0.03 之间。根据成分及工艺参数的不同，可以将此类合金分为低矫顽力、高矫顽力、超高矫顽力类型，如表 2.2-19 所示。

(4) 低温度系数 2∶17 型 (Sm，HR)—Co—Cu—Fe—Zr 合金。在 Sm $(Co_{1-u-v-w}Fe_uCu_vZr_w)_z$ 合金的基础上，通过添加重稀土 Er、Gd 等部分取代 Sm 可以制造具有低温度系数的永磁材料，其主要的原理依据在于：轻稀土金属原子磁矩与 3d 金属原子磁矩是同向平行排列（为铁磁性耦合），而重稀土金属原子磁矩与 3d 金属原子磁矩是反平行排列（称为亚铁磁性耦合），轻稀土金属化合物的磁化强度随温度的升高是降低的，而重稀土化合物的磁化强度随温度的升高而升高，两者具有补偿效应，部分使用重稀土元素取代轻稀土元素可以实现化合物的低甚至零温度系数。表 2.2-20 给出了部分重稀土添加后的 $Sm_{2-x}HR_XCo_{10}Fe_{3.2}Cu_{1.5}Zr_{0.2}$合金的磁性能。从中可以看出，采用重稀土 Er 来取代部分 Sm 的效果最好。

表 2.2-19 SmCoFeCuZr 系永磁材料的种类与磁性能

类型	材料的牌号或成分	B_r (T)	H_{cB} (kA/m)	H_{cM} (kA/m)	$(BH)_m$ (kJ/m³)
低矫顽力	REC—24	0.92～0.98	525.3～541.2	541.2～557.2	175.1～191.0
	REC—30	1.08～1.12	477.6～541.2	493.5～557.2	199.0～214.9
	R—22	0.89～0.98	437.8～579	477.6～636.8	151.2～183
	H—23	0.94～1.02	437.8～541.0	>477.6	159.2～191
	H—25	0.96～1.04	437.8～557.2	>477.6	175.1～206.9
	H—27	1.04～1.10	437.8～557.2	>477.6	206.9～238.8
	R—28	>1.03	>398	>398	206.9～238.8
	XGG—26	≥1.0	>358.2	1034.8	191.0～222.8
	Sm ($Co_{0.65}$ $Fe_{0.28}$ $Cu_{0.05}Zr_{0.02})_{7.7}$	≥1.2		557.2	262.6
	25Sm，50.5Co，15Fe，8Cu，1.5Zr(质量分数)	1.12		525.3	238.8
	26Sm，38Co，25Fe，8Cu，2Zr，1Nd（质量分数）	1.18			251.5
	REC—26	1.02～1.08	636.8～796	>796	199.0～214.9
高矫顽力	XGG—2AA	≥1.0	>652.7	≥1194	175.1～206.9
	Sm ($Co_{0.68}$ $Fe_{0.22}$ $Cu_{0.08}Zr_{0.02}$) 7.4	1.10	788.0	1830.8	222.8
超高矫顽力	Sm ($Co_{0.654}$ $Fe_{0.241}$ $Cu_{0.078}Zr_{0.027})_{8.22}$	1.06	732.3	2388	218.9
	Sm ($Co_{0.67}$ $Fe_{0.22}$ $Cu_{0.08}Zr_{0.03})_{8.0\sim8.33}$			2626.8	214.9

表 2.2-20 添加重稀土后的 $Sm_{2-x}HR_xCo_{10}Fe_{3.2}Cu_{1.5}Zr_{0.2}$ 合金的磁性能

重稀土元素及含量	平均剩磁温度系数 α（50～100℃）	剩磁 B_r（T）	内禀矫顽力 H_{cM}（kA/m）	磁能积 $(BH)_m$（kJ/m³）
0.4Er	−0.006～−0.018（−50～100℃）	0.99	461.6	179.8
0.8Er	0.000～−0.002（20～80℃）	0.94	413.9	143.2
0.58Gd	−0.013	0.84	469.6	132.9
0.72Gd	−0.01	0.81	469.6	120.1
0.4Ho	−0.012	0.86	382.0	121.7
0.8Ho	−0.004	0.72	350.0	82.7
0.4Tb	−0.015	0.72	350.0	103.4
0.8Tb	−0.004	0.66	246.4	58.1
0.4Dy	−0.015	0.72	342.3	74.0
2Gd	−0.06	0.48	421.8	37.4
2Er	0.046	0.60	214.9	35.8

4.2.3 2：17 型 Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_z$ 合金的微观组织形貌

2：17 型 Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_z$ 合金随固溶处理温度及时间的变化呈现出不同的微观组织结构和磁性能，对于具有优良磁性能的合金来讲，一般均具有类似、复杂的胞状组织结构。图 2.2-15 给出了 Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_{7.4}$（质量百分数为 26%Sm、51.4%Co、15.8%Fe、4.4%Cu、2.4%Zr 的）合金固溶处理并在 850℃下进行时效处理后的显微组织结构。从中可以看出合金的显微组织呈细小的胞状，结合图 2.2-16 所示的电子衍射图可以判断胞壁为 1：5 相，胞内为 2：17 相，两相共格，胞径约 50nm，胞壁厚约 5nm。由于此观察平面与 c 轴垂直，故胞为等轴状。图 2.2-17 则为观察平面通过 c 轴时室温下的显微组织，可以明显看到其层状结构。

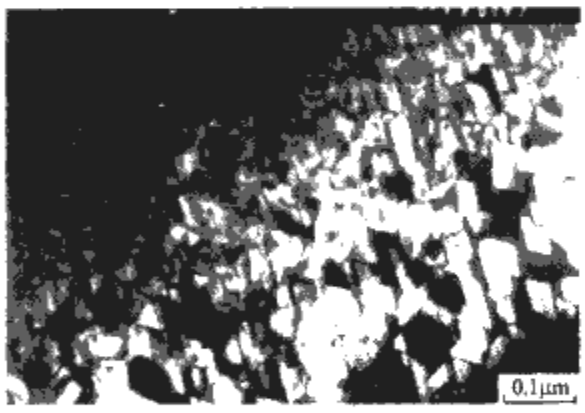


图 2.2-15 Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_{7.4}$ 合金室温下的胞状显微组织图

以上图中所示的胞状组织结构的形成是一个复杂的过程，一般来讲，Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_{7.4}$ 永磁合金胞状组织的出现是 460℃时，形状为球形，500℃时开始形成胞状组织，500～700℃时胞状组织生长发育，700℃时形成完整的胞状组织，790℃时胞状组织发育得十分完善，而通过透射电子显微镜原位动态观察可以发现，780℃出现垂直于 c 轴的富锆薄片相（或称 Z 相），其主要成分为 Zr（Co，Fe）$_3$，830℃时此薄片相贯穿整个视野，穿过胞状组织。通过 Mössbauer 研究可以得到由于锆的加入，铁将由 1：5 相进入 2：17 相，铜、锆等非磁性离子由 2：17 相进入 1：5 相，加大了两相化学成分和磁性能的差别。锆的加入，促使 2：17 相中铁原子由 Co_1 晶位进入 Co_3 晶位，Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_{7.4}$ 永磁合金的胞状组织析出生长为完整的胞状组织的过程，相变时属于扩散型的连续相变。按照以上研究发现，具有高剩磁、高矫顽力的 2：17 型合金应具有如图 2.2-18 所示的理想结构。

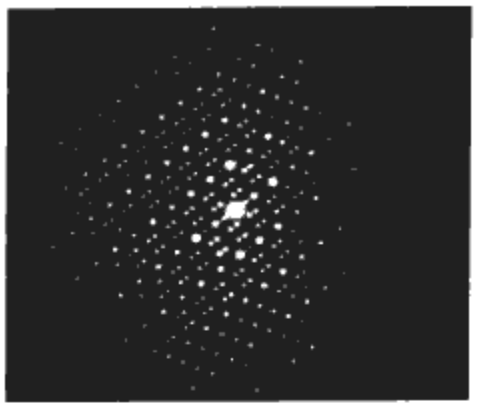


图 2.2-16 Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_{7.4}$ 合金室温下电子衍射花样

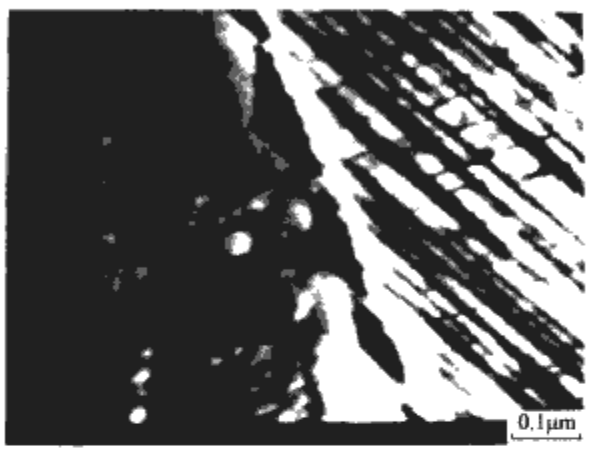


图 2.2-17 Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_{7.4}$ 合金室温下的胞状显微组织图

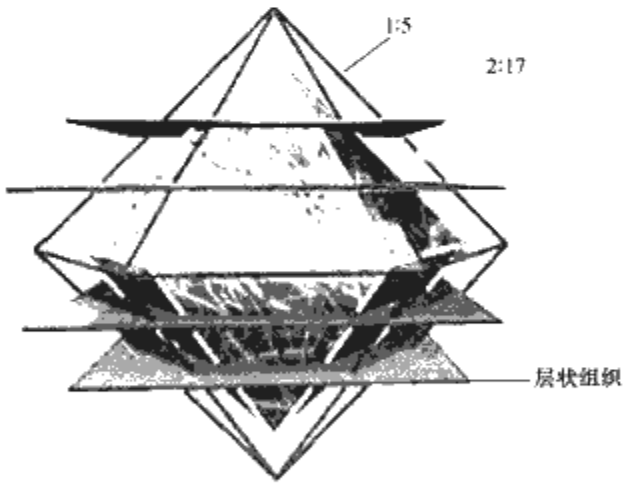


图 2.2-18 2：17 型 Sm（Co，Fe，Cu，Zr）$_{7.4}$ 合金的理想微结构

4.2.4 2：17 型 Sm_2Co_{17} 系永磁材料的矫顽力机理

矫顽力属于显微组织敏感的物理量，受成分及工艺条件的影响，不同类型的 2：17 型 Sm_2Co_{17} 系永磁材料一般其矫顽力机理不同。从多数研究结果来看，热退磁状态的 Sm_2Co_{17} 型合金的起始磁化曲线一般主要有两种类型：对于低矫顽力类型的合金，其起始磁化曲线是典型的钉扎型；而高矫顽力类型的合金开始是典型的均匀钉扎型，随退火 850℃回火时间的延长逐渐向着不均匀钉扎变化。但多数人认为不论是哪种类型的 2：17 型合金，其矫顽力都是沉淀相对畴壁钉扎所引起的，并且矫顽力与胞状组织的形状尺寸等因素有关。有关 1：5 相的畴壁钉扎模型目前主要存在如下

几种观点：

（1）1∶5 相对畴壁移动产生作用力，阻碍畴壁移动，其最大钉扎强度即为矫顽力。引起这种作用的主要原因是1∶5相的畴壁能大于 2∶17 相畴壁能，造成了畴壁大部分位于 2∶17 相内，两相畴壁能之间的差异决定了矫顽力的大小，可以采用下式来描述：

$$H_{cM}=\frac{\gamma_{1:5}-\gamma_{2:17}}{2M_s\delta} \tag{2.2-8}$$

式中：γ 代表两相的畴壁能密度；δ 为畴壁厚度。

（2）磁致伸缩应力 σ_{EM} 与沉淀相应变 ε_D 间磁弹性耦合与畴壁能梯度 $\Delta\gamma$ 共同决定矫顽力大小。其中磁弹性耦合能对矫顽力的贡献可以表达为：

$$H_{cM}=\frac{1}{2M_s\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\left\{\left[\sigma_{11}+\sigma_{23}\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]+\varepsilon_{11}^{D}+\sigma_{33}\varepsilon_{33}\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right\} \tag{2.2-9}$$

式中：α 为菱形胞的顶角。由上式可以看出，磁弹性耦合能对矫顽力的贡献主要来自于 σ_{11} 和 ε_D。

（3）类似于 1∶5 型 $SmCo_5$ 中片状沉淀相反磁化畴的扩张临界场决定的矫顽力。这种观点首先假定 1∶5 相为吸引型的钉扎中心，在平衡状态下，畴壁与胞壁相一致，当畴壁厚度 δ 约为胞壁的厚度时，胞状组织对畴壁的钉扎场为：

$$H_{cM}=\frac{\sqrt{2}K_1}{\pi M_p} \tag{2.2-10}$$

式中：K_1 为基体 2∶17 相的磁晶各向异性常数；M_p 为胞壁 1∶5 相的饱和磁化强度。

（4）面缺陷钉扎模型。这种观点将畴壁当作面缺陷来处理，并假设胞壁的厚度 t 大于畴壁 δ 的厚度，则胞壁对畴壁的钉扎场为：

$$H_{cM}=\frac{2K_1}{M_s}(1-pq)\frac{(1-\sqrt{mP})^2}{(1-mP)^2} \tag{2.2-11}$$

式中：$P=A_{1:5}/A_{2:17}$；$q=K_1^{1:5}/K_1^{2:17}$；$m=M_s^{1:5}/M_s^{2:17}$，上式表明 $A_{1:5}$ 与 $K_1^{1:5}$ 越小，合金的矫顽力就越高。

总之，从以上理论来看，沉淀硬化的 2∶17 型合金的矫顽力与两个方面的因素有关：第一是胞状组织中两相的物理参量，即与两相的磁晶各向异性常数 K_1 和交换积分 A 的差值有关或畴壁能 γ 的差值，一般来说这种因素对矫顽力的贡献是主要的，而且其对矫顽力的贡献随温度的变化是可逆的；第二是胞状组织的形状、尺寸和完整程度。随着时效温度在一定范围内的变化，胞状组织结构发生一定的变化，导致矫顽力发生变化，一般来说，这种变化是不可逆的，其对矫顽力的影响相比第一种因素趋于次要地位。

4.2.5 2∶17 型 Sm_2Co_{17} 永磁材料的稳定性及力学特性

在稀土永磁材料中，2∶17 型 Sm—Co 永磁体具有最佳的磁稳定性。主要体现在如下几个方面：

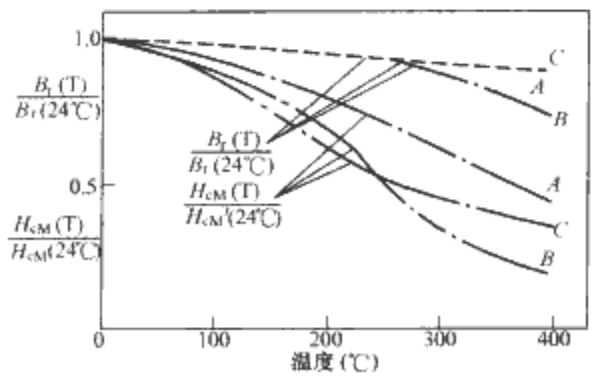


图 2.2-19 Sm(Co，Fe，Cu，Zr)$_{7.4}$ 永磁合金磁性能与温度间的关系

（1）可逆温度系数。图 2.2-19 是具有不同矫顽力的三种 2∶17 型合金磁性能随温度的变化。相应合金的可逆温度系数列于表 2.2-21，可见当样品成分为 Sm($Co_{0.69}Fe_{0.2}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{7.4}$ 时，合金具有最小的可逆温度系数，甚至在 25～400℃的很宽的温度范围内，磁感可逆温度系数也仅有 $-0.034\%℃^{-1}$。矫顽力可逆温度系数也相当低，约 $0.148\%℃^{-1}$。

表 2.2-21 2∶17 型 Sm(CoFeCuZr)合金的磁性可逆温度系数

性能	合金成分	不同温度区间的平均温度系数(%/℃)				
		25～100	25～200	25～250	25～300	25～400
α_{Hr}	Sm($Co_{0.69}Fe_{0.2}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{7.4}$	0.007	0.029	0.027	0.038	0.034
	Sm($Co_{0.29}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{0.9}$	0.034	0.024	0.028	0.045	0.056
	Sm($Co_{0.67}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.07}Ti_{0.07}$)$_{0.9}$	0.010	0.022	0.037	0.036	0.030
α_{Hc}	Sm($Co_{0.69}Fe_{0.2}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{7.4}$	0.090	0.119	0.128	0.145	0.148
	Sm($Co_{0.29}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{0.9}$	0.116	0.176	0.218	0.242	0.220
	Sm($Co_{0.67}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.07}Ti_{0.07}$)$_{0.9}$	0.155	0.208	0.201	0.195	0.170

（2）磁通不可逆损失。Sm(Co，Fe，Cu，Zr)$_{7.4}$ 合金在不同温度下放置引起的磁通总损失如表 2.2-22 所示。从中可以看出三种不同成分的合金在 200℃和 300℃长时间放置，经过再磁化后，不可逆磁通损失为零。350℃放置时，已经出现了不可逆损失。Sm($Co_{0.69}Fe_{0.2}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{7.4}$ 合金在 400℃时效可逆损失占 30%，不可逆损失占 70%，并且随温度的升高，不可逆损失增加。

表 2.2-22 2∶17 型 Sm(CoFeCuZr)$_{7.4}$ 永磁合金不同温度下的磁通损失

磁通损失	合金成分	试验温度(℃)			
		200	300	350	400
磁通总损失	Sm($Co_{0.69}Fe_{0.2}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{7.4}$	1.0～2.0	1.5～2.5	2.7～6.5	9.5～17.5
	Sm($Co_{0.29}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{0.9}$	1.0～1.5	2.0～3.0	2.5～3.3	30～38.0
	Sm($Co_{0.67}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.07}Ti_{0.07}$)$_{0.9}$	1.5～3.0	4.0～13.0	11.0～20.0	19.0～25.0
磁通不可逆损失	Sm($Co_{0.69}Fe_{0.2}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{7.4}$	0	0	1.5～3.0	5.8～8.6
	Sm($Co_{0.29}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.01}$)$_{0.9}$	0	0	2.8～3.6	4.7～6.5
	Sm($Co_{0.67}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.07}Ti_{0.07}$)$_{0.9}$	0	0	1.7～2.6	3.8～4.4

（3）抗氧化行为。采用热重分析设备对 1∶5 型稀土钴烧结磁体和 2∶17 型 Sm(Co，Fe，Cu，Zr)$_{7.4}$ 合金进行测试，发现在 120℃空气环境长时间放置时，样品重量的增加如图 2.2-20 所示，两者相比，2∶17 型钐钴合金具有更好的

抗氧化性能。

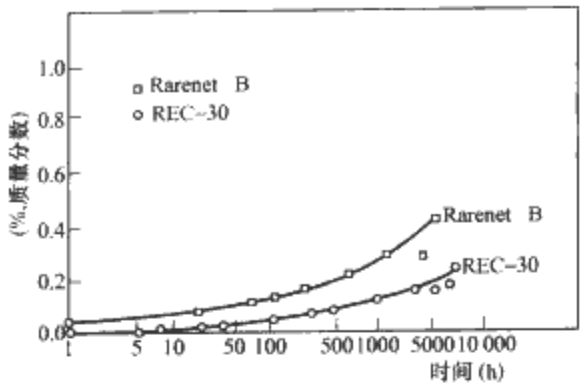


图 2.2-20 $Sm(Co, Fe, Cu, Zr)_{7.4}$合金在120℃空气中的氧化速度曲线

(4) 2∶17型Sm_2Co_{17}合金的抗弯强度和断裂韧性。在室温下，分别采用3点弯曲试验法和SENB法对2∶17型Sm_2Co_{17}永磁合金抗弯强度及断裂韧性进行测试，其结果如表2.2-23所示。结果表明沿平行织构取向的方向其抗弯强度较强。引起这种差别的主要原因是2∶17型Sm_2Co_{17}永磁合金具有复杂的晶体结构，取向后的磁体具有强的各向异性。另外，由于制备工艺的不同，也将导致永磁材料的微观组织结构存在较大差异，从而引起其力学特性的差异。

表 2.2-23 Sm_2Co_{17}永磁材料的抗弯曲强度

剩磁 B_r (T)	磁感矫顽力 H_{cB} (kA/m)	内禀矫顽力 H_{cj} (kA/m)	最大磁能积 $(BH)_{max}$ (kJ/m)	密度 ρ (g/cm^3)	断裂韧性 K_{IC} (MPa·$m^{1/2}$)	抗弯强度 垂直于取向方向 σ_{bb} (MPa)	抗弯强度 平行于取向方向 σ_{bb} (MPa)
1.11	816	1194	224	8.40	1.74	106	82

4.3 Nd—Fe—B稀土永磁材料

1983年日本住友特殊金属公司Sagawa等人首先采用粉末冶金法制造出了以$Nd_2Fe_{14}B$化合物为基体的烧结Nd—Fe—B永磁材料，从而宣告了第三代稀土永磁材料的诞生。Nd—Fe—B永磁材料的出现，使制造商和应用商的全部注意力都集中到了Nd—Fe—B系永磁体上。在短短几年内，Nd—Fe—B永磁体的磁性能就得到了很大的提高。1987年，Tokunaga等人已将烧结Nd—Fe—B永磁体的磁性能提高到$(BH)_{max}=408kJ/m^3$。目前，其磁性能实验室水平已达到$B_r=1.519T$，$H_{cB}=780kA/m$，$(BH)_{max}=451kJ/m^3$。

4.3.1 Nd—Fe—B磁性材料的结构

$Nd_2Fe_{14}B$化合物的晶体结构属于四角晶体（或简称四方相），空间群为P42/mnm，单胞的空间结构如图2.2-21所示。它由四个$Nd_2Fe_{14}B$分子组成。在一个单胞内有68个原子，其中8个Nd原子，占据4f和4g两个晶位；56个Fe原子，占据6个不同的晶位即16k、16k、28j、18j、24e和4c晶位；4个B原子，占据4g(一个)晶位。点阵常数$a=0.882nm$，$c=1.220nm$。Nd和B原子分布在$Z=0$(c)和$Z=0.5$(c)的两个结构层（即第一层和第四层）内，排列成近似的大小菱形，而在第二、三、五、六结构层内仅有Fe原子，排列成六角形或三角形网。B原子占据由基面($Z=0$或0.5)上边和下边各三个最近的Fe原子(e位和k_1位)所构成的三角棱柱体中心，如图2.2-22所示。

$Nd_2Fe_{14}B$相的居里温度由不同晶位上的Fe-Fe原子对和Fe—Nd原子对的交换作用决定。不同晶位上的原子对的间距变化范围从0.239nm($8j_1$-$16k_2$)～0.282nm(4e-4e)，其

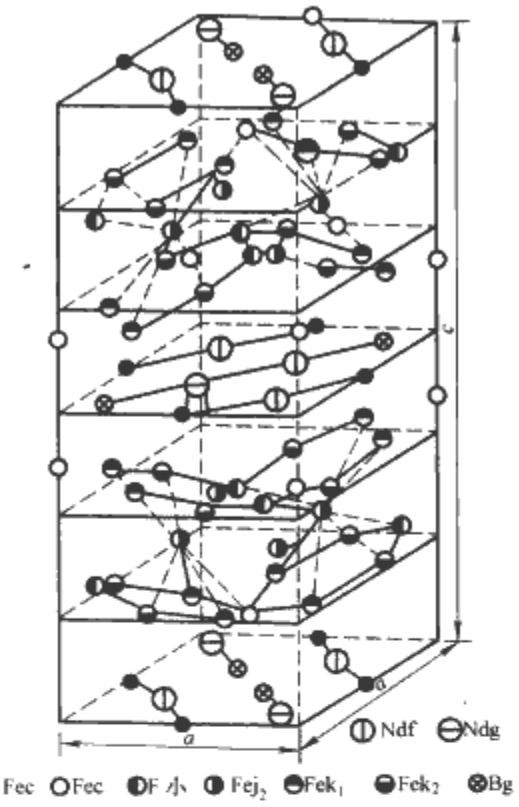


图 2.2-21 $Nd_2Fe_{14}B$化合物的晶体结构

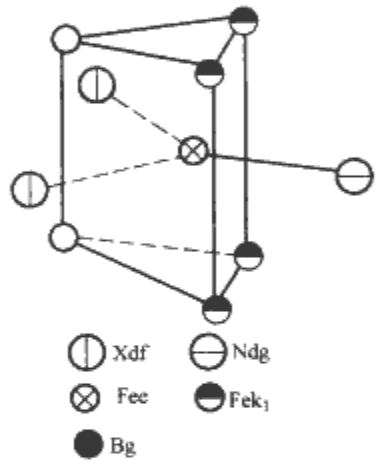


图 2.2-22 在$Nd_2Fe_{14}B$中含有B原子的三角棱柱

中距离大于0.25nm的有27对，交换作用为正；距离小于的0.25nm的有15对，交换作用为负；正负相互作用部分的抵消，使得$Nd_2Fe_{14}B$硬磁相的居里温度较低。$Nd_2Fe_{14}B$单胞中原子占位与原子坐标如表2.2-24所示。

表 2.2-24 室温根据中子衍射试验结果得到的$Nd_2Fe_{14}B$单胞中原子占位与原子坐标

原子	晶位	x	y	z
Nd_1	4f	0.267 9(5)	0.267 9	0
Nd_2	4g	0.140 3(4)	−0.140 3	0
Fe	4c	0	0.500 0	0
Fe	4c	0.500 0	0.500 0	0.113 9(5)
Fe	$8j_1$	0.097 9(5)	0.097 9(5)	0.204 5(2)
Fe	$8j_2$	0.316 7(3)	0.316 7(3)	0.246 4(3)
Fe	$16k_1$	0.223 4(3)	0.567 3(3)	0.217 4(2)
Fe	$16k_2$	0.037 5(3)	0.369 8(3)	0.175 8(2)
B	4g	0.371 1(9)	0.371 1(9)	0

$Nd_2Fe_{14}B$相在室温条件下具有单轴磁各向异性，c为易磁化轴。各向异性主要来源于4g晶位的Nd原子和Fe原子在垂直c轴平面上下不对称分布。k_2晶位所在平面上方

有6个最临近Fe原子，下方只有1个最临近Fe原子，平面上有2个Fe原子。这种结构致使$Nd_2Fe_{14}B$具有很强的单轴磁晶各向异性。

$Nd_2Fe_{14}B$相晶粒的饱和磁化强度主要由Fe原子磁矩决定，Nd原子是轻稀土原子，磁矩与Fe原子磁矩平行取向，属铁磁耦合，对饱和磁极化强度也有贡献，Fe原子磁矩最大2.80μ_B，最小1.95μ_B，平均2.10μ_B。Nd原子磁矩在平行于c轴方向的投影为2.30μ_B。

主要磁性参数为：各向异性常数$K_1=3.9\sim5.1MJ/m^3$，$K_2=0.7\sim1.5\ MJ/m^3$，各向异性场$\mu_0 H_A=7.0\sim8.5T$，饱和极化强度$J_s=1.61\sim1.63T$，居里温度$T_c=576\sim595K$。磁畴结构参数为：畴壁厚度$\delta=3.90\sim5.50nm$，畴壁能密度$\gamma=(2.40\times10^{-2}\sim3.60\times10^{-2})J/m^2$，单畴粒子临界半径$D_c=0.26\sim0.31\mu m$，磁畴宽度$d=0.80\sim0.92\mu m$(不同资料给出的具体值有所不同)。

4.3.2 烧结Nd—Fe—B永磁材料成分设计

通过对磁体微结构的研究，人们发现Nd—Fe—B稀土永磁材料是一种多相结构，主要由$Nd_2Fe_{14}B$相、富Nd相、富B相和其他杂质相构成。由单一的$Nd_2Fe_{14}B$相组成的磁体由于矫顽力极低而不能作为永磁材料使用，富Nd相是保证磁体具备足够高矫顽力所必不可少的非磁性相。在烧结Nd—Fe—B磁体当中通过多种元素添加来提高磁体磁性能和温度稳定性，表2.2-25给出各种添加元素所起的作用及原因，表2.2-26给出添加元素对T_c、M_s和H_{cB}的影响。

表2.2-25 各种添加元素所起的作用及原因

添加元素	正效果	原 因	负效果	原 因
Co替代Fe	T_c↑ α_{Br}↓ 抗蚀性↑	Co的T_c比Fe的高；新的Nd_3Co晶界相代替了原来易腐蚀的富Nd相	B_r↓ H_{cB}↓	Co的M_s比Fe的低；新的晶界相Nd_3Co或$Nd(Fe,Co)_2$是软磁性的，不起磁去耦作用
Dy、Tb替代Nd	H_{cJ}↑	Dy起主相晶粒细化作用；$Dy_2Fe_{14}B$的各向异性场比$Nd_2Fe_{14}B$高	B_r↓ $(BH)max$↓	Dy的原子磁矩比Fe高；但与铁成亚铁磁性耦合，使主相M_s下降
晶界改进元素M_1(Cu，Ga，Sn，Ge，Al，Zn)	抗蚀性↑ H_{cJ}↑	形成非磁性晶界相，使主相磁去耦，同时抑制主相晶粒长大；而且替代原来易腐蚀富Nd相	B_r↓ $(BH)_{max}$↓	非磁性元素M_1部分进入主相代替Fe，使主相M_s下降
难溶元素M_2(Nb，Cr，V，Zr，Mo，W，Ti)	H_{cJ}↑ 抗蚀性↑	抑制软磁性相α-Fe、$Nd(Fe,Co)_2$生成，增强磁去耦作用，抑制主相晶粒长大；新的硼化物晶界相替代原来易腐蚀富Nd相	B_r↓ $(BH)_{max}$↓	在晶界或晶粒中生成非磁性硼化物相，使主相体积分数下降

Onelli等人研究了不同Co含量的取代对磁体微结构的影响。研究表明，随着磁体中Co含量的增加，磁体的耐腐蚀性能线性提高，而磁体的矫顽力急剧下降。从微结构的分析表明，其原因是由于晶界$Nd(Fe,Co)_2$、Nd_7Co_3、$NdCo_3$和$Nd_3(Fe,Co)$相的形成。当Co取代量较少时，形成顺磁性的$Nd_3(Fe,Co)$相，对矫顽力影响不大；而Co含量增加时，就形成了$Nd(Fe,Co)_2$、Nd_7Co_3、$NdCo_3$等软磁性相，这些晶界相在反磁化过程中成为形核点，从而急剧地影响了磁体的矫顽力。

单独用Co取代Fe时，虽然可以提高磁体的耐腐蚀性能，但会使磁体的H_{cB}降低很多。Shimoda等人的研究发现，在用Co部分取代Fe的同时添加适量的Cu或Ga元素可起到较好的补偿效果，这样既可增强磁体的耐蚀性，同时又能保证得到足够的矫顽力。Camp等人认为，在添加Co的同时添加少量的Al，就能获得极佳的耐蚀性又保持较高的矫顽力，其原因也在于形成了Nd_3Co晶界相。利用粉末添加技术，将Dy_3Co、Nd_3Co、$Dy_{1.5}Nd_{1.5}Co$、$RE(Co,Ga)_3$、$RE(Co_{13}Ga)$以及Co、Cu粉末分别或搭配添加到一定成分的主相铸锭中的双合金技术，也被用来提高磁体的耐蚀性能，其目的是在晶界形成富Co或含Co而少Nd的晶界非磁性相，这样既有助于耐蚀性，又不使矫顽力降低。

表2.2-26 添加元素对T_c、M_s和H_{cB}的影响

元素	择优晶位	ΔT_c	ΔM_s	ΔH_{cB}
Ti		−	−	−
V		−	−	−
Cr	$8j_2$	−	−	−
Mn	$8j_2$	−	−	−
Co	$16k_2$，$8j_1$	+	−	−
Ni	$16k_2$，$8j_2$	+	−	−
Cu		+	−	−
Zr		−	−	−
Nb		−	−	+
Mo		/	−	−
Ru		−	/	−
W		−	/	/
Al	$8j_2$，$16k_2$	−	−	+
Ga	$8j_1$，4c，$16k_2$	+	−	+
Si	$4c(16k_2)$	+	−	+

Katter等人通过电化学腐蚀电位的测量，分析了在含Co、Cu、Ga、Al元素的烧结Nd—Fe—B磁体中各相的腐蚀电位，从而为高化学稳定性合金设计提供了思路。该磁体的几个晶界相分别为$Nd_3(Co,Cu)$、$Nd_5(Co,Cu,Ga)_3$和$Nd_6(Fe,Co)_{13}Ga$，使得原先富Nd晶界相的电化学腐蚀电位发生正移，趋近于主相，促使晶间相与主相之间的腐蚀电动势降低，从而减缓了腐蚀速率，获得高化学稳定性磁体。

Steyaert等人用穆斯堡尔谱仪跟踪Al、Co、V、Nb、Mo等添加元素在磁体中的氧化腐蚀行为。V在晶界形成了$(V,Fe)_3B_2$沉淀相并夹杂着Fe—V沉淀颗粒，Nb则形成了Fe_2Nb沉淀相和弥散分布的NbFeB相。这些金属间化合物在晶界上的形成能部分地取代富Nd晶界相，使得晶界相的化学活性下降，提高了磁体的耐蚀性能。同时，Al和Co也会取代主相中的Fe晶位，这对于主相在200℃以上的氧化腐蚀行为起到较大的抑制作用。

可以认为，通过添加微量元素对磁体微结构的影响，尤其是对晶界富Nd相的影响，使得各种具有相对较低稀土含量的金属间化合物相在晶界上形成，从而抑制晶粒长大，提高矫顽力，并能减少晶界相的反应活性，提高了化学稳定性。但到目前为止，对许多元素的作用机理还不十分清楚，

这在今后相当长一段时期内仍是人们重点研究的领域之一。

代换元素：其主要作用是改变主相的内禀特性，可分为两种情况：一种是过渡族元素 Co 替代主相中的 Fe；另一种是重稀土元素 Dy、Tb 替代主相中的 Nd。

掺杂元素也可分为两种情况：一是晶界改进元素 M_1（Cu，Ga，Sn，Ge，Al，Zn），它们在主相中有一定的溶解度，可局部溶于主相代替 Fe，主要作用是形成非磁性的 Nd-M_1 或 Nd-Fe-M_1 晶界相[NdCu 或 $NdCu_2$；$Nd_6Fe_{13}M_1$（M_1 = Cu，Ga，Al，δ 相）；$Nd_3(Fe, Ga)+Nd_5(Fe, Ga)_3$]；另一种是难容元素 M_2（Nb，Cr，V，Zr，Mo，W，Ti），它们在主相中的溶解度极低，以非磁性硼化物 M_2-B 相（ZrB_2，TiB_2）析出，或形成非磁性硼化物 M_2-Fe-B 晶界相（NdFeB，WfeB，Mo_2FeB_2，V_2FeB_2）。总之，微量添加元素可归类为代换元素和掺杂元素。

从表 2.2-27 中可见，Y、La、Ce、Lu 四个稀土元素的原子磁矩为零，由这四个元素构成的 $R_2Fe_{14}B$ 的饱和磁化强度全部由铁的亚点阵贡献。

表 2.2-27 $R_2Fe_{14}B$ 化合物在室温和 4.2K 的磁矩和饱和磁极化强度

$R_2Fe_{14}B$ (R=)	293K	4.2K			
	J_s(T)	$M_{分子}(\mu_B)$	$\mu_J^R(\mu_B/R)$	$g_JJ(\mu_B/R)$	Js(T)
Y	1.38	30.7		0	1.55
La	1.38	30.6		0	1.48
Ce	1.17	29.4		0	1.49
Pr	1.56	37.6	+3.4	3.2	1.84
Nd	1.60	37.6	+3.4	3.3	1.86
Sm	1.50	33.3	+1.3	0.7	1.66
Gd	0.84	17.9	−6.4	−7.0	0.90
Tb	0.70	13.2	−8.4	−9.0	0.66
Dy	0.71	11.3	−9.7	−10.0	0.57
Ho	0.81	11.2	−9.7	−10.0	0.57
Er	0.90	12.7	−9.7	−9.0	0.66
Tm	1.15	18.4	−6.1	−7.0	0.94
Tb					
Lu	1.17	28.2		0	1.45

由表 2.2-28 可见 Y、La、Ce、Lu 四个稀土元素的原子磁矩为零，由这四个元素构成的 $R_2Fe_{14}B$ 的磁晶各向异性主要由铁的亚点阵提供，这四个元素的 $R_2Fe_{14}B$ 的各向异性具有相近的数值。另外 Gd 的 4f 电子数有 7 个，4f 电子处于半满的状态，其轨道磁矩为零，因此 Gd 的各向异性场较小。由重稀土元素构成的 $R_2Fe_{14}B$ 的各向异性场较大，其次是 Nd 和 Pr。

表 2.2-28 $R_2Fe_{14}B$ 化合物在室温和 4.2K 的磁晶各向异性常数平均值 MJ/m^3

$R_2Fe_{14}B$ (R=)	4.2K			293K		
	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
Y	0.8			1.06		
La						
Ce	1.8			1.7		
Pr	24			5.6		
Nd	−16	28	0.45	5.0	0.66	
Sm	−26		−1.4	−12	0.29	−0.29

续表

$R_2Fe_{14}B$ (R=)	4.2K			293K		
	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
Gd	0.65			0.67		
Tb	6.9			5.9		
Dy	3.8			4.5		
Ho	−1.1	4.4	0.12	2.5		
Er	−1.4		−0.29	−0.03		
Tm	−3.6		−0.70	−0.03		

4.3.3 烧结 Nd—Fe—B 永磁材料制备工艺

从制造方法上来说，Nd—Fe—B 系永磁材料主要包括烧结永磁和粘结永磁，其中烧结 Nd—Fe—B 永磁材料的生产技术与性能已基本趋于完善，磁能积的实验值已达到理论值的 70%～80%，其制备工艺如图 2.2-23 所示。速凝工艺是欧美国家制备高性能烧结 Nd—Fe—B 磁体的主流工艺。传统铸锭工艺与速凝薄带工艺有很大差别，普通铸锭的缺陷是含有大量的 α-Fe、主相 $Nd_2Fe_{14}B$ 粗大（约为 50.0μm）、富 Nd 相分布很不均匀、稀土含量难以降低。由于其固有的缺点使磁能积很难突破 398kJ/m³。而速凝薄带工艺制备的磁体具有低稀土含量[接近 28.5%（摩尔分数）]、高 Nd2Fe14B 主相（>95Vol%），且晶粒细小均匀（1～3μm）、高取向度（>96%），富 Nd 相分布均匀、低氧含量和超低 α-Fe 含量的优点。因此速凝薄带工艺是制备高性能烧结 Nd—Fe—B 磁体的关键技术。尤其是磁场成型工艺取得较大突破，即橡皮模等静压（RIP）工艺的开发应用，使得主相晶粒的取向度达到 97%以上，从而把商品化烧结 Nd—Fe—B 材料性能推高至 N48～N53 系列，表 2.2-29 为烧结 Nd—Fe—B 系永磁材料的主相体积分数、取向度与 J_r 的关系，可见主相体积分数越大，取向度越高，则磁体剩余磁化强度 J_r 也就越高。

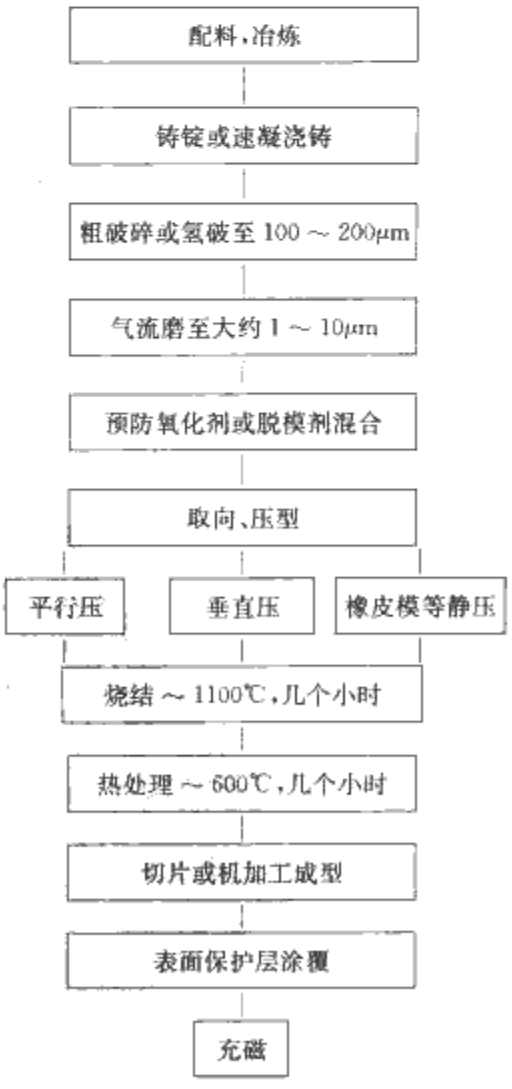


图 2.2-23 烧结钕铁硼磁体制备工艺

表 2.2-29 烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的主相体积分数、取向度与 J_r 的关系

主相体积(%) \ 取向度	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97
0.90	1.287	1.30	1.315	1.330	1.344	1.358	1.372	1.387
0.91	1.301	1.315	1.330	1.344	1.358	1.373	1.387	1.402
0.92	1.315	1.330	1.344	1.358	1.373	1.388	1.403	1.418
0.93	1.330	1.344	1.358	1.373	1.388	1.403	1.418	1.433
0.94	1.344	1.359	1.373	1.388	1.403	1.418	1.433	1.448
0.95	1.358	1.373	1.388	1.403	1.418	1.433	1.448	1.464
0.96	1.373	1.388	1.403	1.418	1.433	1.448	1.464	1.479
0.97	1.388	1.402	1.418	1.432	1.448	1.463	1.479	1.494

4.3.4 烧结 Nd—Fe—B 永磁材料性能

烧结 Nd—Fe—B 磁体作为一种磁性功能材料，人们最关心的是其磁性能指标，如剩磁、内禀矫顽力、最大磁能积等。烧结 Nd—Fe—B 磁体的剩磁可以表示为：$B_r \propto I_s\beta(\rho/\rho_0)\times(1-\alpha)f$，其中 I_s 为饱和磁化强度，β 为饱和磁化强度的温度系数，ρ/ρ_0 为磁体的相对密度，α 为非磁性相在磁体中所占比例，f 为取向度。提高烧结 Nd—Fe—B 磁体的居里温度和内禀矫顽力有助于提高烧结磁体的温度稳定性。

烧结 Nd—Fe—B 磁体矫顽力越高，其温度稳定性能就越好。表 2.2-30 列示了宁波韵升公司烧结 Nd—Fe—B 磁体性能，其中包括剩磁、矫顽力、磁能积和最高工作温度。

表 2.2-30 宁波韵升公司材料性能

牌号	B_r (mT) (kGs)	H_{cB} (kA/m) (kOe)	H_{cJ} (kA/m) (kOe)	$(BH)_{max}$ (kJ/m³) (MGOe)	最高工作温度 T_w (℃)
N27	1030～1080 (10.3～10.8)	≥796 (≥10.0)	≥955 (≥12)	199～231 (25～29)	80
N30	1080～1130 (10.8～11.3)	≥796 (≥10.0)	≥955 (≥12)	223～247 (28～31)	80
N33	1130～1170 (11.3～11.7)	≥836 (≥10.5)	≥955 (≥12)	247～271 (31～34)	80
N35	1170～1220 (11.7～12.2)	≥868 (≥10.9)	≥955 (≥12)	263～287 (33～36)	80
N38	1220～1250 (12.2～12.5)	≥899 (≥11.3)	≥955 (≥12)	287～310 (36～39)	80
N40	1250～1280 (12.5～12.8)	≥ 907 (≥ 11.4)	≥ 955 (≥ 12)	302～326 (38～41)	80
N42	1280～1320 (12.8～13.2)	≥915 (≥11.5)	≥955 (≥ 12)	318～342 (40～43)	80
N45	1320～1380 (13.2～13.8)	≥923 (≥11.6)	≥955 (≥12)	342～366 (43～46)	80
N48	1380～1420 (13.8～14.2)	≥923 (≥11.6)	≥ 876 (≥12)	366～390 (46～49)	80

续表

牌号	B_r (mT) (kGs)	H_{cB} (kA/m) (kOe)	H_{cJ} (kA/m) (kOe)	$(BH)_{max}$ (kJ/m³) (MGOe)	最高工作温度 T_w (℃)
N50	1400～1450 (14.0～14.5)	≥796 (≥10.0)	≥876 (≥11)	382～406 (48～51)	60
N52	1430～1480 (14.3～14.8)	≥796 (≥10.0)	≥876 (≥11)	398～422 (50～53)	60
30M	1080～1130 (10.8～11.3)	≥796 (≥10.0)	≥1114 (≥14)	223～247 (28～31)	100
33M	1130～1170 (11.3～11.7)	≥836 (≥10.5)	≥1114 (≥14)	247～263 (31～33)	100
35M	1170～1220 (11.7～12.2)	≥868 (≥10.9)	≥1114 (≥14)	263～287 (33～36)	100
38M	1220～1250 (12.2～12.5)	≥899 (≥11.3)	≥1114 (≥14)	287～310 (36～39)	100
40M	1250～1280 (12.5～12.8)	≥923 (≥11.6)	≥1114 (≥14)	302～326 (38～41)	100
42M	1280～1320 (12.8～13.2)	≥955 (≥12.0)	≥1114 (≥14)	318～342 (40～43)	100
45M	1320～1380 (13.2～13.8)	≥995 (≥12.5)	≥1114 (≥14)	342～366 (43～46)	100
48M	1360～1430 (13.6～14.3)	≥1027 (≥12.9)	≥1114 (≥14)	366～390 (46～49)	100
50M	1400～1450 (14.0～14.5)	≥1033 (≥13.0)	≥1114 (≥14)	382～406 (48～51)	100
30H	1080～1130 (10.8～11.3)	≥796 (≥10.0)	≥1353 (≥17)	223～247 (28～31)	120
33H	1130～1170 (11.3～11.7)	≥836 (≥10.5)	≥1353 (≥17)	247～271 (31～34)	120
35H	1170～1220 (11.7～12.2)	≥868 (≥10.9)	≥1353 (≥17)	263～287 (33～36)	120

续表

牌号	B_r (mT) (kGs)	H_{cB} (kA/m) (kOe)	H_{cJ} (kA/m) (kOe)	$(BH)_{max}$ (kJ/m³) (MGOe)	最高工作温度 T_w (℃)
38H	1220～1250 (12.2～12.5)	≥899 (≥11.3)	≥1353 (≥17)	287～310 (36～39)	120
40H	1250～1280 (12.5～12.8)	≥923 (≥11.6)	≥1353 (≥17)	302～326 (38～41)	120
42H	1280～1320 (12.8～13.2)	≥955 (≥12.0)	≥1353 (≥17)	318～342 (40～43)	120
45H	1300～1360 (13～13.6)	≥963 (≥12.1)	≥1353 (≥17)	326～358 (43～46)	120
48H	1370～1430 (13.7～14.3)	≥995 (≥12.5)	≥1353 (≥17)	366～390 (46～49)	120
30SH	1080～1130 (10.8～11.3)	≥804 (≥10.1)	≥1592 (≥20)	223～247 (28～31)	150
33SH	1130～1170 (11.3～11.7)	≥844 (≥10.6)	≥1592 (≥20)	247～271 (31～34)	150
35SH	1170～1220 (11.7～12.2)	≥876 (≥11.0)	≥1592 (≥20)	263～287 (33～36)	150
38SH	1220～1250 (12.2～12.5)	≥907 (≥11.4)	≥1592 (≥20)	287～310 (36～39)	150
40SH	1240～1280 (12.5～12.8)	≥939 (≥11.8)	≥1592 (≥20)	302～326 (38～41)	150
42SH	1280～1320 (12.8～13.2)	≥987 (≥12.4)	≥1592 (≥20)	318～342 (40～43)	150
45SH	1320～1380 (13.2～13.8)	≥1003 (≥12.6)	≥1592 (≥20)	342～366 (43～46)	150
28UH	1020～1080 (10.2～10.8)	≥764 (≥9.6)	≥1990 (≥25)	207～231 (26～29)	180
30UH	1080～1130 (10.8～11.3)	≥812 (≥10.2)	≥1990 (≥25)	223～247 (28～31)	180
33UH	1130～1170 (11.3～11.7)	≥852 (≥10.7)	≥1990 (≥25)	247～271 (31～34)	180
35UH	1180～1220 (11.8～12.2)	≥860 (≥10.8)	≥1990 (≥25)	263～287 (33～36)	180
38UH	1220～1250 (12.2～12.5)	≥876 (≥11.0)	≥1990 (≥25)	287～310 (36～39)	180
40UH	1240～1280 (12.5～12.8)	≥899 (≥11.3)	≥1990 (≥25)	302～326 (38～41)	180
28EH	1040～1090 (10.4～10.9)	≥780 (≥9.8)	≥2388 (≥30)	207～231 (26～29)	200

续表

牌号	B_r (mT) (kGs)	H_{cB} (kA/m) (kOe)	H_{cJ} (kA/m) (kOe)	$(BH)_{max}$ (kJ/m³) (MGOe)	最高工作温度 T_w (℃)
30EH	1080～1130 (10.8～11.3)	≥812 (≥10.2)	≥2388 (≥30)	223～247 (28～31)	200
33EH	1130～1170 (11.3～11.7)	≥836 (≥10.5)	≥2388 (≥30)	247～271 (31～34)	200
35EH	1170～1220 (11.7～12.2)	≥876 (≥11.0)	≥2388 (≥30)	263～287 (33～36)	200
38EH	1220～1250 (12.2～12.5)	≥899 (≥11.3)	≥2388 (≥30)	287～310 (36～39)	200

图 2.2-24 是日本 TDK 烧结 Nd—Fe—B 磁体不可逆损失 5%时，矫顽力与使用温度的关系，可见烧结磁体矫顽力越高，其不可逆损失 5%时磁体的试验温度越高。表 2.2-31 为不同牌号烧结 Nd—Fe—B 磁体剩磁和矫顽力温度系数，可见磁体的矫顽力越高，其矫顽力温度系数也就越低。

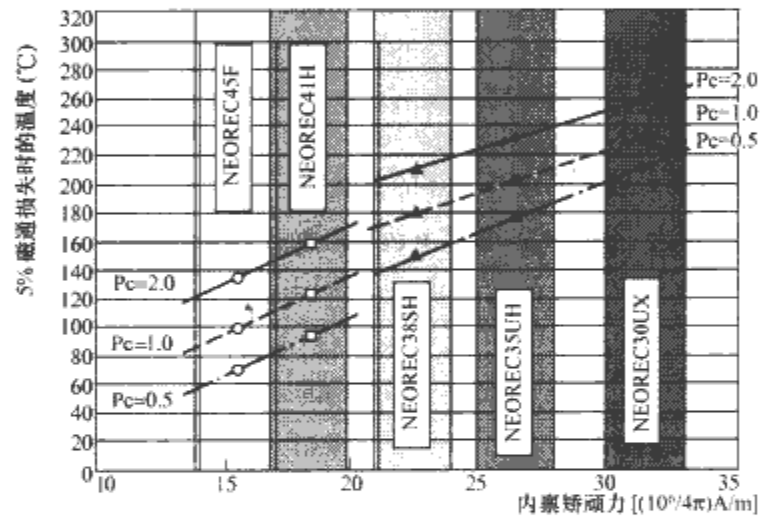


图 2.2-24 日本 TDK 烧结 Nd—Fe—B 磁体不可逆损失 5%时，矫顽力与使用温度的关系

4.3.5 低温度系数 Nd—Fe—B 磁体

从图 2.2-25 可见烧结 Nd—Fe—B 磁体的剩磁和矫顽力温度系数远高于烧结 SmCo 磁体，因此降低烧结 Nd—Fe—B 磁体温度系数，提高磁体稳定性一直是人们研究的目标之一。上表是 Nd—Fe—B 系三元合金的温度系数、居里点和工作温度与其他永磁材料的对比。可见三元系烧结 Nd—Fe—B 永磁材料的温度稳定性很不理想。

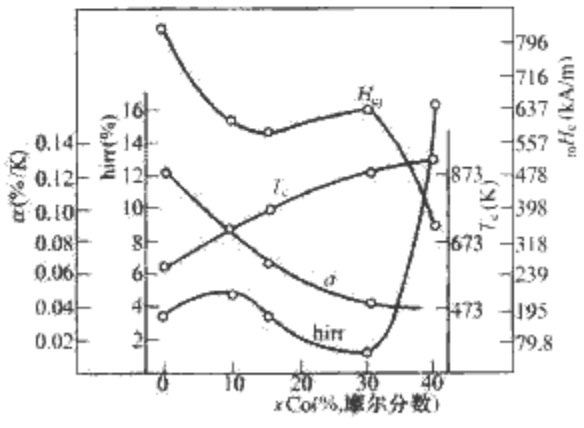


图 2.2-25 烧结 $Nd_{15.5}Fe_{77-x}Co_xB_{7.5}$ 合金的居里温度 T_c，磁感可逆温度系数 α，磁通不可逆损失 hirr 随 Co 含量的变化

表 2.2-31 不同牌号烧结 Nd—Fe—B 磁体剩磁和矫顽力温度系数

牌号	B_r 的温度系数 $\frac{\Delta B_r}{\Delta T}\times 100/B_r$ [(20℃)(%℃$^{-1}$)]	H_{cJ} 的温度系数 $\frac{\Delta H_{cJ}}{\Delta T}\times 100/B_r$ [(20℃)(%℃$^{-1}$)]	回复磁导率 μ_{rec}	密度 (g/cm^3)	线膨胀系数 (10^{-6} ℃$^{-1}$)
N48	−0.11	−0.59	1.05	7.50	$\alpha_{//}=6.5$
N46BH	−0.11	−0.58	1.05	7.50	$\alpha_{\perp}=-0.5$
N46	−0.11	−0.60	1.05	7.50	$\alpha_{//}=5.5$
N45	−0.11	−0.60	1.05	7.50	$\alpha_{\perp}=-2.8$
N45H	−0.11	−0.58	1.05	7.50	$\alpha_{//}=5.5$
N41H	−0.11	−0.58	1.05	7.50	$\alpha_{\perp}=-2.8$
N35H	−0.11	−0.58	1.05	7.50	$\alpha_{//}=6.5$
N39SH	−0.11	−0.55	1.05	7.60	$\alpha_{\perp}=-0.5$
N35EH	−0.10	−0.47	1.05	7.60	$\alpha_{//}=7.4$
N32EH	−0.09	−0.45	1.05	7.60	$\alpha_{\perp}=-0.5$
N33UH	−0.11	−0.51	1.05	7.60	

Co 可以有效改善烧结 Nd—Fe—B 磁体的剩磁温度系数，Co 每取代 1at.%的 Fe 可使 Nd—Fe—B 磁体的居里温度提高 10.9℃，烧结 $Nd_{15.5}Fe_{77-x}Co_xB_{7.5}$ 合金，Co 添加量少于 10%时是十分有益的，既提高了合金的 T_c，又维持了较高的磁性能，同时磁感温度系数也得到改善。目前面临的最大问题是在有效降低烧结 Nd—Fe—B 磁体温度系数的同时如何最大限度的提高磁体的磁性能。

表 2.2-32 烧结 Nd—Fe—B 磁体和烧结 Sm-Co 磁体性能对比

项 目	Nd—Fe—B 磁体	SmCo 磁体
成分	Nd、Fe、B 和其他微量元素	Sm、Co、Fe、Cu、Zr 等
制备方法	烧结	烧结
磁特性		
最大磁性积 $(BH)_{max}\left(\frac{100}{4\pi}\text{kJ/m}^3\right)$	30～50	16～32
剩磁 B_r(T)	1.1～1.4	0.82～1.16
内禀矫顽力 $H_{cJ}\left(\frac{1000}{4\pi}\text{kA/m}\right)$	11～25	6.2～20
回复磁导率	1.05	1.05
可逆剩磁温度系数(%℃$^{-1}$)	−0.11～−0.13	−0.03～0.04
矫顽力温度系数 (%℃$^{-1}$)	−0.55～−0.65	−0.15～−0.3
物理性能		
居里温度(℃)	320	800
密度 (g/cm^3)	7.3～7.5	8.2～8.4
热膨胀系数		
$C//$0～100℃(℃$^{-1}$)	5.2×10^{-6}	8×10^{-6}
$C\perp$0～100℃(℃$^{-1}$)	-0.8×10^{-6}	11×10^{-6}
力学特性		
抗压强度 (10MPa)	110	82
抗拉强度(10MPa)	7.5	3.6
维氏硬度	550～650	500～650
电阻(Ω·m)	130×10^{-6}	88×10^{-6}
所需充磁场 $\left(\frac{1000}{4\pi}\text{kA/m}\right)$	25	15 (Sm_2Co_{17}) 25($SmCo_5$)

表 2.2-32 为烧结 Nd—Fe—B 磁体和烧结 Sm—Co 磁体性能对比，可见相对于烧结 Sm—Co 磁体烧结 Nd—Fe—B 磁体的剩磁温度系数和矫顽力温度系数更高，同时磁体的使用温度较低，但是烧结 Nd—Fe—B 磁体相对于烧结 Sm—Co 磁体具有较高的磁性能和力学性能指标。表 2.2-33 为 Nd—Fe—B 三元合金与其他永磁合金，如：$SmCo_5$、2：17 型 Sm—Co 合金、Al—Ni—Co 合金、铁氧体和 Mn—Al—C 合金材料的温度特征的比较。

表 2.2-33 Nd—Fe—B 三元合金与其他永磁合金温度特征的比较

合金	居里点 T_c(℃)	磁感应温度系数 (20～100℃)α (%/℃)	矫顽力温度系数 (20～100℃)β (%/℃)	最高工作温度 (℃)
$SmCo_5$	720	−0.045	−(0.2～0.3)	256
2：17 型 Sm-Co 合金	820	−0.025	−(0.2～0.3)	350
Nd-Fe-B 三元合金	310	−0.126	−(0.5～0.7)	100
Al-Ni-Co 合金	800	−0.02	−0.03	500
铁氧体材料	450	−0.20	−0.40	300
Mn-Al-C 合金	310	−0.12	−0.40	120

4.3.6 烧结 Nd—Fe—B 材料微观结构和耐蚀性

Nd—Fe—B 磁体是一个复杂的多相体系，其中包括：主相 $Nd_2Fe_{14}B$、富钕相、富硼相，如图 2.2-26 所示；烧结 Nd—Fe—B 材料物理性能表如表 2.2-34 所示。Nd—Fe—B 磁体基体相 $Nd_2Fe_{14}B$ 有较完整的晶体结构，很少观察到一、二、三维缺陷和第二相沉淀。相对于烧结态来说，回火后其矫顽力可以提高一倍以上，但回火前后晶粒内部没有明显的变化，有变化的仅是晶界。烧结 Nd—Fe—B 磁体的化学稳定性差，所谓化学稳定性是指永磁材料的抗氧化和耐腐蚀程度。相对于传统的铁氧体或 Sm 系永磁，烧结钕铁硼的化学稳定性是最差的。如直接暴露在大气中就会不断氧化、发生锈蚀。由于烧结钕铁硼磁体是粉末冶金工艺制造、由多相构成的复合组织，其表面存在着磨削加工所产生的恶化层和材料自身存在的一些气孔、氧化相等。空气中的水分就从磁体表面的或接近表面的富 B 相和气孔处进行腐蚀。目前解决钕铁硼永磁体化学稳定性的办法主要是添加某些合金元素如 Co、Ni、Al 和 Cr 等，同时在烧结工艺中尽量提高密度、减少气孔。如通过 Co+Ni+Al 的复合添加，合金磁体在 70℃和相对湿度 95%的环境中进行 48h 实验，其表面仍有金属光泽而未见腐蚀。另一种解决化学稳定性的办法是对磁体进行表面处理，如电镀、化学镀等表面处理，可使磁体获得实用的耐腐蚀性能。

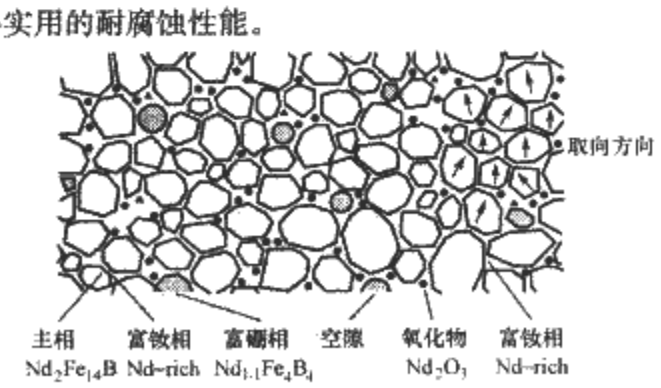


图 2.2-26 烧结 Nd-Fe-B 磁体微观结构示意图

表 2.2-34 烧结 Nd-Fe-B 材料物理性能

性能 \ 方向	C//	C⊥
线膨胀系数(1/℃)	7.8×10^{-6}	$0.1\sim0.4\times10^{-6}$
热导率[W/(m·℃)]	6.16	6.75
比热容[kJ/(kg·℃)]	0.46	
居里点(℃)	345～365	
抗弯强度(MPa)	345	295
杨氏模量(N/m^2)	1.5×10^{11}	
密度(g/cm^3)	7.4～7.6	
硬度(HV)	620	
电阻率(Ω·cm)	2.0×10^{-4}	1.8×10^{-4}

4.3.7 烧结 Nd—Fe—B 磁体的生产和应用

20 世纪永磁材料的蓬勃发展，已成为高新技术、新兴产业与社会进步的重要物质基础之一，以 Nd—Fe—B 为代表的稀土永磁材料是磁性能最高、应用最广、发展速度最快的新一代永磁材料，已广泛应用于电子、自动聚焦系统、信息技术、航空航天等领域，在国民经济的发展中占有重要地位。小到手表、照相机、录音机、DVD 机，大到汽车、发电机、磁悬浮列车，永磁材料无所不在，和人们的生活息息相关。毫无疑问，在新世纪里稀土永磁材料为适应高新技术日益向小型、轻便、多功能与智能化发展的要求，正向着高性能、高稳定性的方向发展，我国烧结 Nd—Fe—B 产量的增长情况如图 2.2-27 所示，表 2.2-35 为 2003～2005 年烧结 Nd—Fe—B 磁体在中国的应用情况。

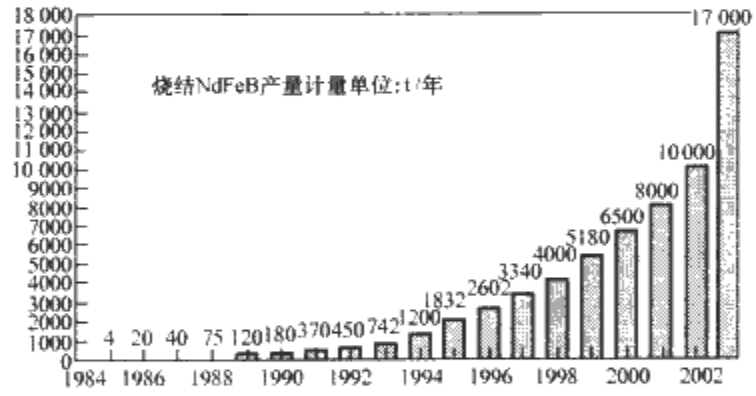


图 2.2-27 我国烧结 Nd—Fe—B 产量增长图

表 2.2-35 2003～2005 年烧结 Nd—Fe—B 磁体在中国的应用情况

年份	2003	2004	2005
高技术领域 MRI	360(2.32%)	560(2.44%)	760(2.51%)
VCM	200(1.28%)	350(1.53%)	530(1.75%)
CD pick-up	840(5.4%)	1150 (5.01%)	1540(5.1%)
DVD-ROM+CD-ROM	1250(8.0%)	1800 (7.86%)	2440(8.09%)
Mobile phone	360(2.3%)	680(3%)	950(3.15%)
Cordless tools	950(6.1%)	1250(5.46%)	1490(4.94%)
EB+EAV	1340(8.6%)	2200(9.6%)	3010 (10%)
合计	5300(34%)	7990(34.9%)	10 720(35.54%)
传统领域 Speaker	3550(22.9%)	5200(22.7%)	6800(22.54%)
Magnetic separator	2100(13.5%)	2800(12.22%)	3500(11.6%)
Magnetizer(dewaxer)	1600(10.3%)	2300(10.04%)	2950(9.8%)
合计	7250(46.7%)	10 300(44.95%)	13 250(43.94%)
低档应用	2550(16.4%)	3840(16.75%)	4980(16.51%)

我国有丰富的稀土资源，占全球总蕴藏量 80%以上，自 1984 年以稀土元素 Nd 和廉价的 Fe 为基的 Nd—Fe—B 稀土永磁体产业化生产以来，在我国已形成可观的产业规模，烧结 Nd—Fe—B 产量由 1985 年的 10t 到 1998 年的 4000t，再到 2003 年的 17 000t(见图 2.2-32)，目前我国稀土永磁产品大部分出口，为国家创造了大量外汇，产值已占到全球 Nd—Fe—B 产量的 70%。

随着稀土永磁产品档次以及物理、机械性能的提高，除了在已有应用领域中的需求量不断增长之外，其使用范围被极大扩展，从而开拓并带动新兴产业的发展，推动了我国产业结构的调整，给国民经济带来新的增长点，更重要的是可以为加强我国国防实力，提高综合国力做出巨大贡献。

4.3.8 存在的问题

采用速凝工艺、高精度粒度分级技术、RIP 成型工艺等，使得烧结 Nd—Fe—B 磁体的性能不断提高(见图 2.2-33)，日本在大生产中，烧结 Nd—Fe—B 磁体的最大磁能积 $(BH)_{max}$ 已超过 $400kJ/m^3$(50MGOe)(N50)，实验室水平已达到 $444kJ/m^3$(55.8MGOe)，德国的实验室水平也已达到 451kJ/m(56.7MGOe)，而我国仍处于落后状态。我国高性能永磁体的大生产水平仅停留在 N42～N45 的范围，即便有个别厂家能达到 N50 档次生产水平，但其磁体的均匀一致性、温度稳定性和时效稳定性较差。

Nd—Fe—B 稀土永磁材料的上述宏观性能与微观结构之间存在着密切的联系。这是因为 Nd—Fe—B 稀土永磁材料是一种多相结构，富 Nd 晶界相起着重要的磁去耦作用，但同时又是引起磁体磁性能差的重要原因。正是由于 Nd—Fe—B 稀土永磁材料这种复杂多变的微观结构以及微结构对宏观磁性能的强烈影响，为科研人员通过优化生产工艺和成分设计来构成理想的相结构，尤其是晶界相的结构，从而为制造出高性能 Nd—Fe—B 系列磁体奠定基础，烧结 Nd—Fe—B 材料的最大磁能积随时间的变化如图 2.2-28 所示。因此，对 Nd—Fe—B 稀土永磁材料的生产工艺和晶界结构进行深入细致的研究，提高磁体的稳定性，拓展 Nd—Fe—B 稀土永磁材料的市场应用具有重要的理论和实际意义。

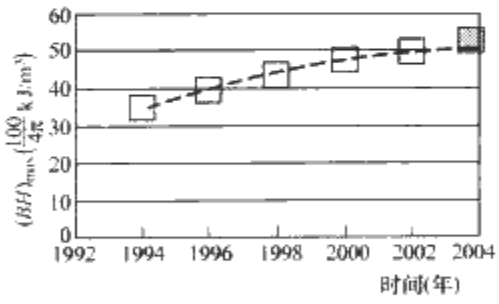


图 2.2-28 烧结 Nd—Fe—B 磁体最大磁能积随时间的变化

5 其他永磁材料

5.1 Fe—Cr—Co 系永磁材料

Fe—Cr—Co 永磁合金具有和 Al—Ni—Co 合金相同的磁硬化起因，都是由于固溶体发生亚稳分解引起的铁磁性相颗粒的形状各向异性。1971 年，日本东北大学教授金子秀夫和本间基文等人成功的研制出了含 23%Co 的具有永磁性能的 Fe—Cr—Co 合金。因为它具有可以进行冷热加工的特性，其磁性能可与 $AlNiCo_5$ 合金相媲美，且钴含量低于 $AlNiCo_5$ 合金，成本低，故它可作为形状复杂的小型永磁元件的材料。

5.1.1 Fe—Cr—Co 永磁合金成分及状态图

Fe—Cr—Co 永磁合金属于亚稳分解型永磁合金。1971～1973 年间的合金成分[%(质量分数)]为：27～28Cr，23～26Co，3Mo 或 0.7～1Si，剩余为 Fe。1974 年以后，随着研究的深入，将 Fe—Cr—Co 永磁合金的含钴量由 25%降低到 15%以下，Cr 含量在 23%左右。从状态图 2.2-29 可见，单相区 α 在 1300℃以上，(α+γ)相区在 1300～700℃左右，700℃以下为($\alpha_1+\alpha_2$)相区。Fe—Cr—Co 永磁合金是在 Fe—Cr 二元合金基础上发展起来的，Co 的添加提高了 Fe—Cr 二元合金的饱和磁化强度和居里温度，扩大了亚稳分解温度范围，Co 通常被认为是对矫顽力起重要作用的元素。Co 含量的提高是有前提的，即 Cr 含量也必须相应的提高，使得调幅分解时能顺利的形成合理的两相($\alpha_1+\alpha_2$)配比，否则多余的 Co 含量会失去"依托"，起不到相应的作用。

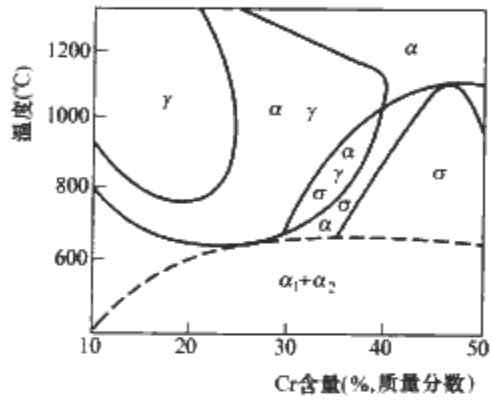


图2.2-29 Fe—Cr—15Co 系合金相图

另外，一些微量元素的添加也可以改善合金的部分性能，如 Mo、Ti 的加入对提高合金的矫顽力十分有益，对于钴含量高的合金效果更加明显；添加少量的 Cu 对于采用"形变—时效"工艺制造的 Fe—Cr—Co 系合金磁性能的改善有相当明显的效果，磁能积比不含 Cu 的合金提高近 7.96kJ/m³，同时还提高了合金的 B_r/B_s 值及矫顽力 H_c；Nb、Al、Si、V、Ti 对合金的影响主要体现在相图上，它们的加入可以扩大 α 相区，图 2.2-30 和图 2.2-31 是 Fe—Cr—15Co 合金中分别加入 Nb 和 Al 后的相图，可以知道 Nb 和 Al 的单独加入虽然对相结构的改善起到了一定作用，但 α 相区的范围仍然有限。只有当两种元素复合加入时，如图 2.2-31 所示才能将非磁性相"压缩"到最小，此时固溶温度甚至可以仅仅高于混溶间隙 $\alpha_1+\alpha_2$ 的分解温度即可。

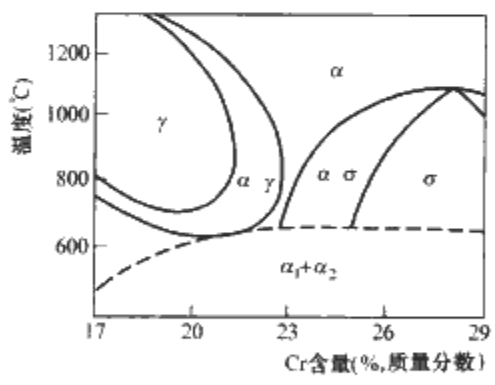


图 2.2-30 添加 1%Nb 的 Fe—Cr—15Co 垂直截面图

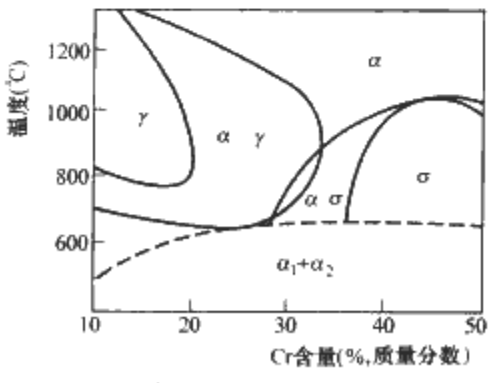


图 2.2-31 添加 1% Al 的 Fe—Cr—15Co 垂直截面图

值得指出的是 Al 的含量不宜超过 1%，否则磁性能就要下降，实验表明当 Al 含量由 1%变为 1.3%时，磁能积就由 32kJ/m³ 变为 20kJ/m³。Si 作为一种有益的合金元素，其合适的含量为 1%，对 Co 含量为 10%～25%范围内的合金，加入 Si 都是有益的，但对于低 Co 合金则不然，如 Fe—28Cr—8Co 合金的 $(BH)_{max}$ 值一般在 48kJ/m³ 以上，加入 1%Si 后，$(BH)_{max}$ 仅为 2.8kJ/m³。与 Nb 和 Al 对合金的影响相似，V 和 Ti 对合金的影响也主要体现在扩大 α 相区的范围，如图 2.2-32 和图 2.2-33 所示。Fe—23Cr—15Co—3V—2Ti 合金在合适的热处理制度下(固溶温度取 1000℃，磁场热处理温度取 660℃)可获得 $B_r=1.35$T，$H_c=43.8$kA/m，$(BH)_{max}=44$kJ/m³ 的磁性能；添加 Ni 除了能抑制 γ 相的形成、改善 Fe—Cr—Co 合金的冷加工性以外，还可减少一些 Co 含量而不致降低磁性，缓和固溶处理条件，另外还可以改善非磁性相的分布状态。例如，对于 Cr 24%、Co>15%的合金，添加 1%～2%的 Ni，就可将 Co 含量减少至 10%，而 $(BH)_{max}$ 达到 48kJ/m³。

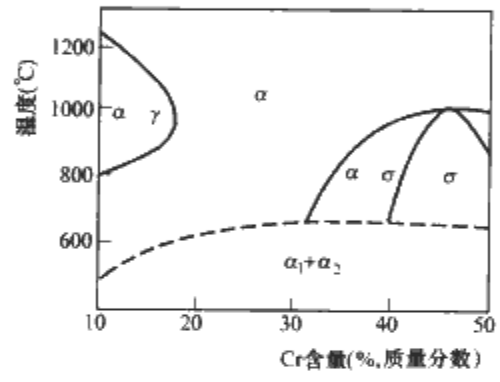


图 2.2-32 添加 1%Nb+1.5%Al 的 Fe—Cr—15Co 垂直截面图

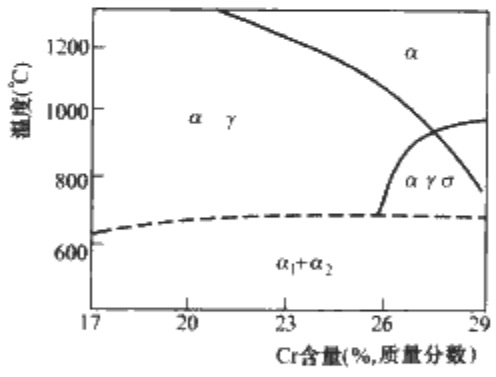


图 2.2-33 添加 3% V 的 Fe—Cr—15Co 垂直截面相图

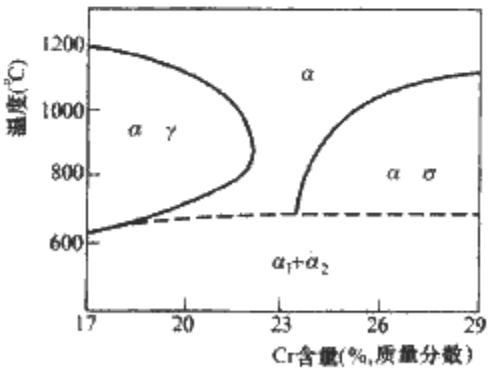


图 2.2-34 添加 3%V+2%Ti 的 Fe—Cr—15Co 垂直截面相图

5.1.2 Fe—Cr—Co 永磁合金的制备工艺

Fe—Cr—Co 合金自诞生以来，制造工艺不断发展，现

已形成以传统工艺、缓冷工艺为主，其他工艺相辅的几种制备方法。传统工艺如图 2.2-35 所示，该工艺主要分为三步：固溶处理、磁场热处理和分级回火处理。固溶处理在高温 1100～1300℃下进行，经固溶化处理后保证基体是单相 α，然后再在亚稳分解温度下进行磁场热处理；磁场热处理温度在 620～660℃之间，外加磁场大于 159kA/m 下进行等温磁场热处理，保温时间根据零件体积大小而定，一般为 20～30min；分级回火采用阶梯式从 620℃降温至 520℃，温度越低，时效时间越长。缓冷工艺，其特点是固溶处理和磁场热处理制度与传统工艺相同，而在回火过程中采用了连续缓冷制度取代分级时效。合金在此方法处理下获得的磁性能比较稳定，开始温度和时间可以在一个较宽的范围内进行，有利于工业生产。其他工艺，为了获得高矫顽力和高磁能积所必需的粒子形状各向异性，可采用适当的定向旋锻工艺来改善粒子的形态，从而获得高的磁性能。但是这种处理工艺需要附加复杂的设备及工序，也不易进行大批量生产；对操作过程要求严格，束缚了它的应用。形变时效工艺与旋锻工艺有一定的相似性：用机械法进行单轴变形以拉伸合金，使析出相粒子的直径减小至长径比约为 1∶3 的最佳状态。粉末冶金工艺的前半部分与稀土永磁相似，也是通过熔炼、制粉、压型、烧结等流程获得成型磁体，所不同的是必须再进行固溶处理、磁场热处理和分级回火。

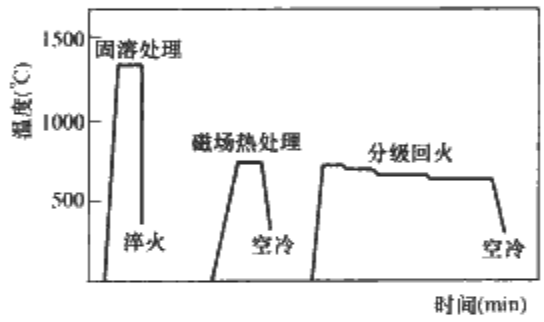


图 2.2-35 传统的 Fe—Cr—Co 合金热处理工艺示意图

5.1.3 Fe—Cr—Co 永磁合金的性能和应用

经过几十年的发展，有实用价值的合金 Cr 含量为 21%～33%(质量分数)，Co 含量为 3%～26%(质量分数)，形成了一系列高剩磁高磁能积，高矫顽力高磁能积的可加工 Fe—Cr—Co 永磁合金，其磁性能可与 $AlNiCo_5$ 相媲美，与用普通方法轧制的 Vicalloy、Cunife、Cunico 等磁体相比，磁性能显著提高，其磁能积为轧制合金 VicalloyⅡ的 5 倍(图 2.2-36)，而价格却比较低。

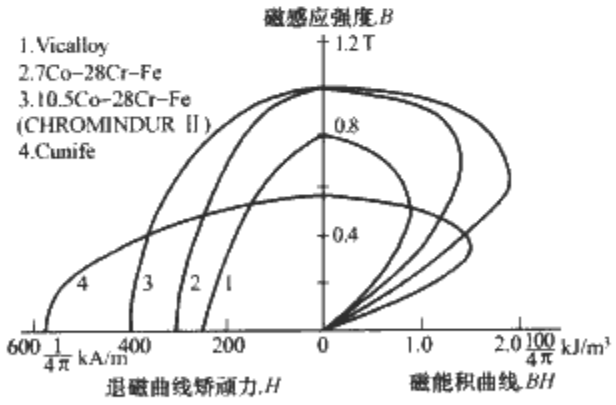


图 2.2-36 Fe—Cr—Co 合金的退磁曲线和磁能积与 Vicalloy 和 Cunife 合金相比较

在我国，Fe—Cr—Co 合金有三个国家标准牌号，分别是 2J83、2J84、2J85。它们的磁性能大致为：$B_r = 1.05 \sim 1.3T$，$H_c = 44 \sim 52kA/m$，$(BH)_{max} = 24 \sim 48kJ/m^3$。表 2.2-36 是这三种合金的应用情况。

表 2.2-36 国标 2J83、2J84、2J85 合金应用举例

C	参考牌号	典型应用实例
冷拉丝材	2J84	航海磁罗径矫正磁钢，磁翻转显示系统用磁钢，恒温控制仪器用磁钢，磁力搅拌器磁钢，微型步进电机转子磁钢，组合旋具磁钢
冷轧带材	2J85	汽车里程表冲压磁钢，汽车电流表磁钢，感应式汽车仪表用磁钢，电子计算机矩阵元件磁钢，助听器话筒磁钢，经纬仪管状磁罗针，森林罗盘仪磁针
热轧棒材	2J84	磁化节油器用磁钢，石油勘测仪器用磁钢，自动化仪表用磁钢
	2J85	内磁式扬声器用磁钢，航海磁罗径指向磁钢，磁化节油器用磁钢，铁路信号仪器用磁钢，直线电机用磁钢，自动洗衣机水位开关，乳制品流量计用磁钢
热轧扁材	2J84	离心器瓦片磁钢，伺服阀磁钢，汽车雨刷器磁钢
	2J85	直流电机定子磁钢，磁性天平吸引器磁钢，各种电度表用磁钢
锻制棒材	2J83	军事工程项目用磁钢，低速永磁电机转子磁钢
	2J84	蒸汽流量计组合磁钢，磁力选矿机用磁钢
	2J85	油田井下定位器磁钢，自动化仪表用磁钢，低速永磁电机转子磁钢

各国 Fe—Cr—Co 永磁合金的最佳性能见表 2.2-37，采用柱晶技术，可使 24%(质量分数)Cr，15%(质量分数)Co，3%(质量分数)Mo，1%(质量分数)Ti，余 Fe 的 Fe—Cr—Co 永磁合金的性能达到：$Br = 1.5T$，$H_c = 67.2kA/m$，$(BH)_{max} = 76kJ/m^3$。采用形变时效工艺可获得 $(BH)_{max} = 80kJ/m^3$ 的可加工 Fe—Cr—Co 永磁合金。

5.2 (Fe，Co)—Pt 系永磁材料

铂基永磁合金有 Co—Pt、Fe—Pt 合金，这类合金具有高矫顽力，$H_c = 400kA/m$，$(BH)_{max} \geqslant 120kJ/m^3$。铂基永磁合金具有良好的可加工性，较强的抗腐蚀能力，可在硫酸、硝酸苛性碱等腐蚀介质中工作。该合金含有贵重元素铂，价格昂贵，仅限于用作精密和贵重仪表的磁性元件。

5.2.1 Co—Pt 合金

5.2.1.1 Co—Pt 合金的状态图及物性

在变形的高矫顽力合金中，钴铂合金具有最高的矫顽力 H_c：多晶试样上达 430kA/m，在沿[111]方向从单晶上切取的试样上达 557kA/m。在钴铂合金的单晶上获得了最高的 $(BH)_m$ 值——113kJ/m³。图 2.2-38 为 Co—Pt 合金状态图。含 50%(摩尔分数)Co 的 Co—Pt 合金，在 825℃以上形成面心无序固溶体；825℃以下形成稳定的面心四方有序相，结构见图 2.2-37 作为永磁合金的含 Co 量在 50%(摩尔分数)左右。表 2.2-38 是有序及无序相的晶格常数。表 2.2-39 为有序及无序的饱和磁化强度及磁晶各向异性常数。

表 2.2-37 各国 Fe—Cr—Co 系永磁合金成分及最佳性能

合金成分①(%)								磁性能			制取方法	国别
Cr	Co	Mo	Ti	Si	Cu	Ni	Fe	B_r (T)	H_c (kA/m)	$(BH)_m$ (kJ/m³)		
30	25	3.0	0.5				余	1.0	86.4	36.0	铸造	中国
30	25	3.0				1.0	余	1.0	86.4	36.0	铸造	中国
23	15	2.0	0.5				余	1.4	56.0	59.2	柱晶	中国
30	23			1.0			余	1.3	78.4	64.0	单晶变形	日本
24	15	3.0	1.0				余	1.53	66.4	76.0	柱晶	日本
22	15		1.5				余	1.55	51.2	66.4	等轴晶	日本
25	12		1.5				余	1.45	50.4	61.6	等轴晶	日本
26	10		1.5				余	1.44	47.2	54.4	等轴晶	日本
29	6		1.5				余	1.28	45.6	40.0	等轴晶	日本
30	4		1.5				余	1.25	45.6	40.0	等轴晶	日本
33	23				2.0		余	1.30	86.4	78.4	形变时效	美国
33	16			2.0			余	1.29	70.4	64.8	形变时效	美国

① 质量分数。

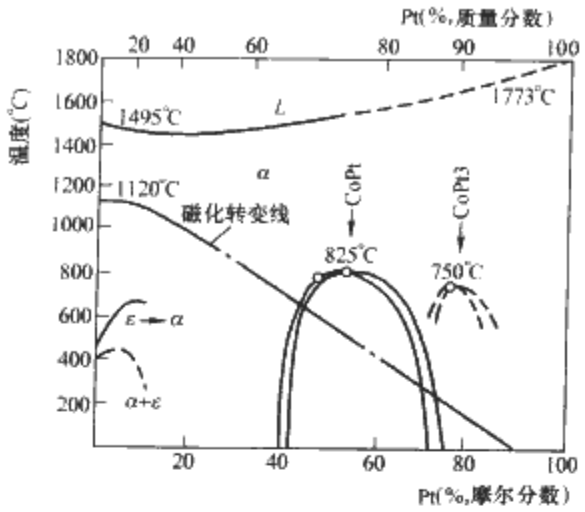


图 2.2-37 PtCo 系状态图

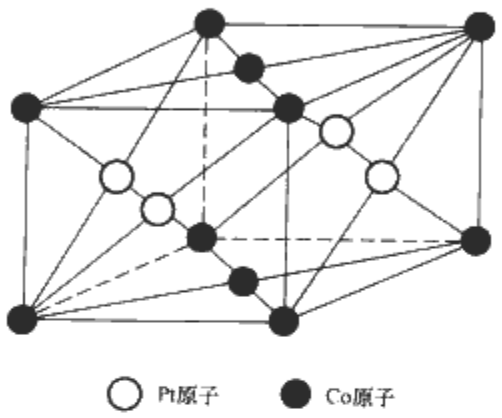


图 2.2-38 Co—Pt 合金有序相的晶体结构

表 2.2-38 无序及有序 Co—Pt 合金的晶格常数

成分 Co %(摩尔分数)	无序(面心立方)		有序(面心四方)			
	热处理	a (10^{-10}m)	热处理	a (10^{-10}m)	c (10^{-10}m)	c/a
50(单晶)		3.751		3.793	3.675	0.969
41.62(多晶)	从 1000℃水冷	3.801	700℃时效	3.798	3.746	0.987
47.64(多晶)	从 1000℃水冷	3.782	700℃时效	3.812	3.708	0.973
53.80(多晶)	从 1000℃水冷	3.749	700℃时效	3.771	3.694	0.989
52(单晶)	从 1000℃水冷	3.776	724℃100h 时效	3.803	3.724	0.979

表 2.2-39 52%(摩尔分数)Co—Pt 合金有序及无序单晶的磁性

磁性及磁晶各向异性常数	饱和磁化强度 σ_s (Am²/kg)		磁晶各向异性常数(J/m³)						易磁化方向
			$K_1\times10^4$		$K_2\times10^4$		$(K_1+K_2)\times10^6$		
测定温度	77K	298K	77K	298K	77K	298K	77K	298K	
无序相(面心立方)	46.8	44.7	−7.61	−6.25		16			[111]
有序相(面心四方)	38.2	37.6					2.05	1.72	[001]

表 2.2-40 列出了淬火和最佳热处理后含 23%～25%(质量分数)Co 的 Co—Pt 合金的物理性能和机械性能。Co—Pt 合金在淬火(无序)状态下是可塑的。热变形温度范围为 1000～1100℃。冷变形之前合金必须从这些温度淬火。不足够快的冷却将导致脆化和硬度提高,在最佳回火时硬度提高 1.5 倍以上。具有最高矫顽力的合金具有较高的脆性。在有序状态下,化学计算成分的合金[含 Co 为 35%(摩尔分数)]具有最小的 ρ 值(28μΩ·cm),而在淬火状态下则具有最大的 ρ 值(46μΩ·cm)。随 Co 含量从 30%(摩尔分数)增到 72%(摩尔分数)密度从 18.04g/cm³ 减少到 12.6g/cm³。

表 2.2-40 Co—Pt 合金(23～25%(质量分类)Co)的物理性能和力学性能

成分 Co %(摩尔分数)	无序(面心立方)		有序(面心四方)			
	热处理	a (10^{-10}m)	热处理	a (10^{-10}m)	c (10^{-10}m)	c/a
50(单晶)		3.751		3.793	3.675	0.969
41.62(多晶)	从 1000℃水冷	3.801	700℃时效	3.798	3.746	0.987
47.64(多晶)	从 1000℃水冷	3.782	700℃时效	3.812	3.708	0.973
53.80(多晶)	从 1000℃水冷	3.749	700℃时效	3.771	3.694	0.989

在 350℃以下长时间(1000h)保温后经热处理的合金依然保持着自己的磁性,加热到 100～120℃时 B_r 的变化是可逆的,约为 4%(磁感温度系数 $\alpha_B=0.042\%$)。在更高的温度下经磁化的试样的磁通在等温保温的头 5min 内迅速减少。把保温时间进一步增加到 1000h 实际上影响不大。因此,使用于较高温度下工作的磁体在最高的工作温度下在几小时内是稳定的。

5.2.1.2 Co—Pt 合金的制备工艺及磁性能

Co—Pt 合金获得高矫顽力是由于在无序相中析出 200～500Å 的微细粒子的有序相,有序相具有高的畴壁能,畴壁从无序相横切有序相时畴壁能增加,畴壁被钉扎。为了得到高的磁能积,应有效地控制有序相析出,一般的热处理工艺为 1000℃×1h 固溶处理,第一次时效 680℃×10min,第二次时效 600℃保温 0.5～1h。图 2.2-39 显示的是第一步时效(例如 560、600、640、680、720℃或者 760℃)过程中内禀矫顽力随时效时间的变化关系。在每一时效温度下,内禀矫顽力都有一个峰值,峰值在 600℃到 720℃时效时要比 760℃和 560℃大,此结果的产生正是由于时效温度决定的有序微观结构。

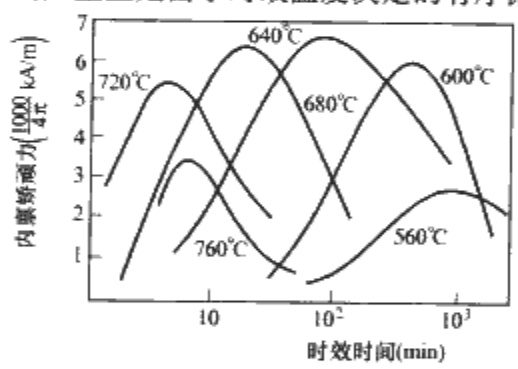


图 2.2-39 第一步时效过程中内禀矫顽力随时效时间的变化关系

最近又研究通过一些补充工艺,可以进一步提高合金的性能。借助于从 1000℃控制冷却(1～10℃/min)和补充回火或在 660℃的盐浴池中从同一温度恒温淬火时以临界速度冷却后可以获得高的磁性能。急剧淬火或以大压下量变形后回火合金具有更低的性能。冷变形和周期性热处理的交替进行能提高含铂量少的合金的磁性能,而又保持高的机械性能。近年来采用合理地选择合金化元素和热处理制度的方法来大大提高 Co—Pt 合金的最大磁能积。表 8-6 列出了最大磁能积高于 75.6kJ/m³ 的合金的化学成分和热处理。采用铁、镍、铜综合合金化和结合采用一次热处理的方法能使最大磁能积提高到 107～115kJ/m³。

5.2.2 Fe—Pt 合金

5.2.2.1 Fe—Pt 合金的状态图

根据平衡相图图 2.2-40,Fe—Pt 合金在高温为面心立方固溶体(γ),在低温存在三个有序相:Fe_3Pt(γ_1)、FePt(γ_2)和 $FePt_3$(γ_3)。Fe_3Pt 为有序面心立方结构(Cu_3Au 型),有序临界温度 835℃。将 Fe－24.5%(摩尔分数)Pt 以及邻近成分的合金从无序固溶体(γ)状态下淬火,便可得到体心立方马氏

体相(α),其马氏体点 Ms=−5℃,马氏体惯习面为{3,15,10}γ,位向关系(011)α//(111)γ 和[$\bar{1}$11]α//[$\bar{1}$01]γ。如果将 Fe—24.5%(摩尔分数)Pt 合金从有序面心立方 γ_1 淬火,也可以得到体心立方马氏体 α 相($\gamma_1 \rightarrow \alpha$)。母相的这种有序或部分有序处理对马氏体特征有明显影响。

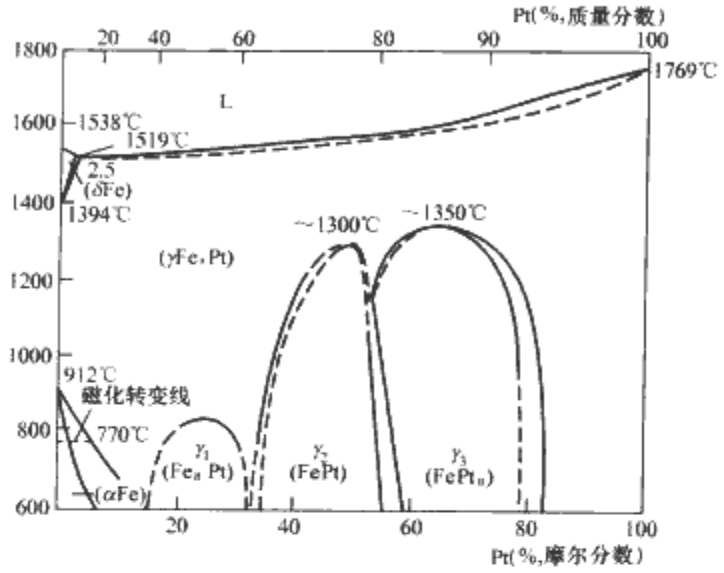


图 2.2-40 Fe—Pt 系状态图

5.2.2.2 Fe—Pt 合金的磁性能

在接近等量原子组成的 Fe—Pt 合金中有序化进行的十分迅速,以致用回火也不能抑制住,因此等原子比组成的 Fe—Pt 合金难于形成性能优良的永磁合金。Fe—Pt 系合金成分靠近铁侧,含 38.5%(摩尔分数)Pt,在 500℃时效 100h,可以得到 $B_r=1.08$T,$H_c=340$kA/m,$(BH)_{max}=159$kJ/m^3 的永磁合金。对于 Fe—Pt 合金,加入微量的 Nb 在很大的成分范围内可以有效的提高合金的矫顽力,成分为 $Fe_{59.75}Pt_{39.5}Nb_{0.75}$ 经过最佳的热处理工艺,磁性能可以达到 $B_r=1.05$T,$H_c=398$kA/m,$(BH)_{max}=167$kJ/m^3。

5.3 永磁薄膜

永磁薄膜材料因其特有的磁性能和材料形状,使其成为微电子与信息技术的关键物质材料。在近 20 年中,薄膜永磁材料的研究基本上是与其块状材料同步开展的,在已研究的薄膜永磁材料中,几乎包括了所有高性能永磁材料,如有 FePt/CoPt 永磁薄膜、SmCo 类永磁薄膜、$Nd_2Fe_{14}B$ 类永磁薄膜、MnBi 合金膜和铁氧体永磁薄膜等。制备永磁薄膜的手段基本囊括了大部分的薄膜制备方法,有化学还原法、磁控溅射法、脉冲激光沉淀法和 MBE 法等,最常用的方法是磁控溅射法。磁控溅射镀膜的特点:溅射原子的离化率比较高;靶的功率密度大,沉积速率高,比阴极溅射提高一个数量级以上;由于磁控溅射靶上施加的电压相对于阴极溅射要低,抑制了高能带电离子轰击基底。因此对基底造成的损伤小,同时避免基底温度的过度升高。这些特点可以更好的控制膜层组分和显微结构等问题,符合制备具有好的晶体结构和择优取向的永磁薄膜的要求。

表 2.2-41 列出了几种永磁薄膜的制备方法、磁性能和晶体结构特点。永磁薄膜材料可以用来制备微型电机和马达,在信息技术、垂直磁记录、微型机械、微型机器人等方面有广阔的应用前景。永磁薄膜可以像半导体元件那样进行微米制版。因此,它可以集成到微型传感器、微波毫米波集成电路、集成光学系统和微电子机械系统中,提供一个强的局域磁场或一组交变磁场。永磁薄膜材料已经成功的使用在一些磁场传感器、集成光学隔离器、毫米直径马达等器件中。

表 2.2-41 几种永磁薄膜的制备方法、磁性能和晶体结构特点

永磁薄膜种类	制备方法	磁性能	结构特点
$SmCo_5$ 薄膜	高溅射速率(0.5nm/s)磁控溅射,700℃退火 60min	$B_r=0.6$T $\mu_0 H_{cJ}=1.3$T $(BH)_{max}=80$kJ/m^3	(200)织构,c 轴在膜平面内
	低溅射速率(0.15nm/s)磁控溅射,700℃退火 60min	$B_r=1.1$T $\mu_0 H_{cJ}=0.6$T $(BH)_{max}=160$kJ/m^3	(110)织构,c 轴在膜平面内
Sm_2Co_{17} 薄膜	磁控溅射后退火	$B_r=1.0$T $\mu_0 H_{cJ}=0.7$T $(BH)_{max}=168$kJ/m^3	(110)织构,c 轴在膜平面内
Nd—Fe—B 薄膜	低溅射速率(小于0.18nm/s)磁控溅射后退火	$B_r=0.97$T $\mu_0 H_{cJ}=1.4$T $(BH)_{max}=168$kJ/m^3	c 轴垂直于膜平面
Fe—Pt 薄膜	直流磁控溅射法,在 Si 单晶基片上沉积 Fe/Pt 多层膜,500℃退火	$B_r=0.63$T $\mu_0 H_{cJ}=1.2$T $(BH)_{max}=120$kJ/m^3	各向同性薄膜
Mn—Bi 薄膜	高真空电子束蒸发到玻璃基片上,在 350 ~ 425℃ 退火 4h	$B_r=0.73$T $\mu_0 H_{cJ}=0.242$T $(BH)_{max}=114.4$kJ/m^3	六角 Ni-As 型结构

第3章 软磁材料

1 电磁纯铁

电磁纯铁是工业纯铁中用量较大的一种软磁材料，其特点是饱和磁感应强度 B_s 和磁导率 μ 高，矫顽力 H_c 低，并且加工性和焊接性好，制造成本低。由于其电阻率低，在交变磁场下涡流损耗大，适于静态或较低频率下使用。除了在特殊钢、功能材料等领域作为原材料有大量使用，还主要用于制造电磁铁心、极头、继电器、扬声器磁导体、磁屏蔽罩等直流下使用的电器元件。电磁纯铁主要有热轧板、冷轧板材、棒材等制品。

1.1 牌号及其用途

电磁纯铁（热轧厚板、冷轧薄板、棒材）牌号及其用途见表 2.3-1。

表 2.3-1 电磁纯铁牌号及其用途①

牌号	用途
DT3、DT3A②	一般电磁元件
DT4、DT4A、DT4E、DT4C	无磁时效电磁元件

① 表 2.3-1、表 2.3-2 及表 2.3-3 均参考中华人民共和国国家标准 GB 6984—1986《电磁纯铁热轧厚板技术条件》、GB 6985—1986《电磁纯铁冷轧薄板》和 GB 6983—1986《电磁纯铁棒材技术条件》。

② 在数字后面所加的字母表示电磁性能：A—高级、E—特级、C—超级。

1.2 电磁纯铁化学成分

电磁纯铁（热轧厚板、冷轧薄板、棒材）化学成分要求见表 2.3-2。

表 2.3-2 电磁纯铁化学成分

牌号	化学成分（%）								
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Cu
DT3 DT3A	≤0.04	≤0.20	≤0.30	≤0.020	≤0.020	≤0.50	≤0.10	≤0.20	≤0.20
DT4 DT4A DT4E DT4C	≤0.025	≤0.20	≤0.30	≤0.020	≤0.020	0.15～0.50	≤0.10	≤0.20	≤0.20

1.3 电磁纯铁的制取

采用铁水脱硫、顶吹或顶底吹冶炼以及真空处理进行连铸或模铸，铸坯经轧制、热处理等相应的加工及处理工艺制成热轧厚板、冷轧板材或棒材。由于炼钢工艺水平的提高，电磁纯铁的杂质大大降低，因此其纯度可以达到 99.8%～99.9%。

1.4 电磁纯铁性能

1.4.1 相关定义

1. 矫顽力（H_c）

磁场强度从饱和状态单调变化所得到的矫顽磁场强度值，单位符号为 A/m。

2. 最大磁导率（μ_m）

对应正常磁化曲线上磁导率的最大值，单位符号为 10^{-3}H/m。

1.4.2 性能指标

电磁纯铁（热轧厚板、冷轧薄板、棒材）性能要求见表 2.3-3。

表 2.3-3 电磁纯铁性能要求

牌号	矫顽力 H_c（A/m）不大于	矫顽力时效增值 ΔH_c 不大于（A/m）	最大磁导率 μ_m 不小于（10^{-3} H/m）	磁感应强度（T）不小于						
				B_{200}	B_{300}	B_{500}	B_{1000}	B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$
DT3	96.0	—	7.5	1.20	1.30	1.40	1.50	1.62	1.71	1.80
DT4	96.0	9.6	7.5							
DT3A	72.0	—	8.8							
DT4A	72.0	7.2	8.8							
DT4E	48.0	4.8	11.3							
DT4C	32.0	4.0	15.1							

注 B_{200}、B_{300}、…、$B_{10\,000}$ 分别表示在磁场强度为 200A/m、300A/m、…、10 000A/m 时的磁感应强度。

1.5 成品尺寸要求

1.5.1 电磁纯铁冷轧薄板

电磁纯铁冷轧薄板的厚度允许偏差分为高级精度（A）和超级精度（CA）两级，如表 2.3-4 和表 2.3-5 所示。

表 2.3-4 电磁纯铁冷轧薄板高级精度（A）的厚度允许偏差 mm

厚度	厚度允许偏差	
	宽度<500	宽度 500～1500
0.10，0.15，0.20	±0.02	±0.03
0.25，0.30，0.35，0.40	±0.03	±0.04
0.45，0.50，0.55，0.60	±0.04	±0.05
0.65，0.70，0.75	±0.05	±0.06
0.80，0.90，0.95，1.00	±0.05	±0.08
1.10，1.20，1.25	±0.05	±0.09
1.3，1.4，1.5	±0.06	±0.11
1.6，1.7，1.8	±0.07	±0.12

续表

厚 度	厚度允许偏差	
	宽度<500	宽度 500～1500
2.0，2.2	±0.08	±0.14
2.5，2.8，3.0	±0.09	±0.16
3.2，3.5	±0.10	±0.18
3.9，4.0	—	±0.20
4.2，4.5	—	±0.22

表 2.3-5 电磁纯铁冷轧薄板超级精度（CA）的厚度允许偏差 mm

厚 度	厚度允许偏差	
	宽度<500	宽度 500～1500
0.50～1.0	±0.03	±0.04
>1.0～1.5	±0.04	±0.05
>1.5～2.0	+0.04，−0.05	±0.05
>2.0～2.5	±0.05	±0.06
>2.5～3.0	±0.07	±0.08
>3.0～4.0	—	±0.10

注 表 2.3-4、表 2.3-5 均参考中华人民共和国国家标准 GB 6985—1986《电磁纯铁冷轧薄板》。

1.5.2 电磁纯铁热轧厚板

电磁纯铁热轧厚板的尺寸及允许偏差应符合 GB 709—1965《热轧厚钢板品种》的规定。

1.5.3 电磁纯铁棒材

电磁纯铁棒材的尺寸及允许偏差应符合表 2.3-6 所列相应标准的规定。

表 2.3-6 电磁纯铁棒材尺寸及允许偏差相应符合标准

棒材品种	相 应 标 准	
	标准号	标准名称
锻制棒材	GB 908—1972	锻制圆钢和方钢品种
热轧棒材	GB 702—1986	热轧圆钢和方钢尺寸、外形、重量及允许偏差
冷轧棒材	GB 905—1982	冷轧圆钢尺寸、外形、重量及允许偏差
热轧圆管坯	YB 187—1965	碳素钢圆管坯

注 本表参考中华人民共和国国家标准 GB 6983—1986《电磁纯铁棒材技术条件》。

1.6 国内主要生产厂家

我国生产电磁纯铁的主要厂家有太原钢铁（集团）有限公司、宝山钢铁股份有限公司和武汉钢铁（集团）公司。

1. 太原钢铁（集团）有限公司

根据太原钢铁（集团）有限公司企业标准，电磁纯铁的化学成分、磁性能要求见表 2.3-7 和表 2.3-8。

表 2.3-7 太原钢铁（集团）有限公司企业标准规定的电磁纯铁化学成分

牌 号	化学成分（%）					
	C	Si	Mn	P	S	Al
DT9 标准	≤0.015	≤0.15	≤0.15	≤0.010	≤0.005	0.20～0.55
DT8 标准	≤0.025	≤0.20	≤0.15	≤0.15	≤0.010	0.15～0.50
DT9 新实际	≤0.004	≤0.15	≤0.15	≤0.003	≤0.001	0.14

续表

牌 号	化学成分（%）			
	Ni	Cr	Cu	[O] [N]
DT9 标准	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.05
DT8 标准	≤0.20	≤0.10	≤0.15	
DT9 新实际	≤0.01	≤0.01	≤0.01	

表 2.3-8 太原钢铁（集团）有限公司企业标准规定的电磁纯铁磁性能

牌号		矫顽力 H_c 不大于（A/m）	最大磁导率不小于 μ_m（10^{-3}H/m）	磁感应强度不小于（T）				
				B_{500}	B_{1000}	B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$
标准	DT9C	40	18.8	1.50	1.57	1.64	1.70	1.80
	DT9E	40～64	17.5					
	DT8	96	7.5	1.40	1.50	1.62	1.71	1.80
	DT8A	72	8.8					
DT9 新实际		40	25	1.55	1.59	1.67	1.75	1.85

注 DT9 新实际的电磁性能完全达到 DT9。

2. 宝山钢铁股份有限公司

根据宝山钢铁股份有限公司暂行供货技术条件 BZJ 482—2005《电磁纯铁冷轧钢带》的规定，电磁纯铁冷轧钢带的牌号及用途、成分、成品尺寸、性能要求见表 2.3-9～表 2.3-13。

表 2.3-9 BZJ 482—2005 规定的电磁纯铁冷轧钢带的牌号及用途

牌 号	尺寸范围（mm）	用 途
DT4E	厚度：0.60～1.60	制造电磁继电器衔铁和轭铁
	宽度：800～1250	

表 2.3-10 BZJ 482—2005 规定的电磁纯铁冷轧钢带化学成分

牌 号	化学成分（%）					
	C	Si	Mn	P	S	Al
DT4E	≤0.010	≤0.30	≤0.40	≤0.10	≤0.030	≤0.050

表 2.3-11 BZJ 482—2005 规定的电磁纯铁冷轧钢带的厚度允许偏差

牌号	公称厚度（mm）	厚度允许偏差（mm）
DT4E	0.60	±0.035
	>0.60～0.80	±0.045
	>0.80～1.50	±0.05
	>1.50～1.60	±0.06

表 2.3-12 BZJ 482—2005 规定的电磁纯铁冷轧钢带的磁性能

牌号	矫顽力 H_c 不大于（A/m）	最大磁导率 μ_m 不小于（10^{-3}H/m）	磁感应强度不小于（T）			
			B_{1000}	B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$
DT4E	48	11.3	1.50	1.62	1.71	1.80

注 保证电磁纯铁冷轧钢带的矫顽力时效增值不大于 10%，时效后矫顽力值不大于 48A/m。

表 2.3-13 BZJ 482—2005 规定的电磁纯铁冷轧钢带力学性能

牌 号	硬度范围值①
	HV1
DT4E	85～125

①硬度为三点平均值。

2 无取向电工钢

2.1 冷轧无取向电工钢

冷轧无取向电工钢主要分为以下两类：

第一类为中低牌号冷轧无取向电工钢，是指硅（或硅加铝）含量小于或等于1.7%的电工钢，在变形和退火后的钢板中晶粒呈无规则取向分布，铁损值一般高于4.70W/kg。中低牌号冷轧无取向电工钢的产量占电工钢产量的80%以上，主要用于制造微电机和功率小于100kW的中小型电机。这些电机应用于机床、纺织、水泵等工业领域，以及电风扇、空调、电冰箱、洗衣机等家用电器与办公设备。

第二类为高牌号冷轧无取向电工钢，是指硅（或硅加铝）含量为1.7%～4.0%的电工钢，在变形和退火后的钢板中晶粒呈无规则取向分布，铁损值一般低于4.70W/kg。主要用于制做容量较大的大中型电机、发电机和小型变压器。

2.1.1 冷轧无取向电工钢成分要求

根据牌号要求对各元素的含量进行控制，牌号不同，对各元素含量的要求也不同。

2.1.1.1 中低牌号冷轧无取向电工钢

化学成分对中低牌号冷轧无取向电工钢性能的影响如下：

（1）硅的影响。随着硅含量从0.1%增加到1%，由于电阻率ρ增高，$P_{1.5/50}$不断降低，但B_{5000}也下降。硅含量提高0.1%，ρ增高约1.3$\mu\Omega\cdot$cm，$P_{1.5/50}$降低0.11W/kg。

（2）碳的影响。碳为有害元素。碳扩大γ相区并且降低相变温度，碳含量高会使成品退火温度降低，晶粒长大不充分，铁损增高。碳化物尺寸、形态和分布对电工钢晶粒组织、织构和磁性都有较大影响。0.5mm厚的0.9%Si钢中碳含量每增加0.01%，$P_{1.5/50}$平均增高0.66W/kg。碳含量增加也会引起磁时效。因此要求成品中碳小于0.003%。最好炼钢时将碳含量降到0.005%以下，成品完全退火时不脱碳或少脱碳。

（3）锰的影响。锰与硫会形成MnS，可以防止沿晶界形成的低熔点FeS所引起的热脆现象，因此要保证一定量的锰来改善热轧塑性。锰扩大γ相区，MnS在γ相中的固溶度乘积比在α相中要低，易于形成粗大MnS，有利于以后晶粒长大。锰可以改善热轧板的组织和织构，促使（100）和（110）组分加强，（111）组分减弱，改善成品磁性。锰的作用与硫含量有密切关系。经证明，当含0.004%～0.017%硫时，提高锰含量使MnS粗化，晶粒容易长大。硫含量小于0.004%时，锰含量增高使晶粒变小，因为热轧板预退火后析出细小$MnSiN_2$。硫和锰含量都低时，晶粒更容易长大。因为低硫低锰钢常化后晶粒更粗化，改善了织构和磁性，并且磁各向异性小。

（4）磷的影响。磷可以提高电阻率ρ、缩小γ相区，促使晶粒长大，降低铁损。磷沿晶界偏聚可以提高（100）组分和减少（111）组分，因此也使B_{5000}提高。磷还明显提高产品的硬度和改善冲片性，在阻碍碳化物析出和长大以及减轻磁时效方面也起到一定作用。但是如果磷含量过高，特别在碳含量很低的情况下，会使冷加工性变差，导致产品发脆。

（5）硫的影响。硫是有害元素。硫含量提高，$P_{1.5/50}$会明显增高。硫与锰形成细小MnS时能够强烈阻碍成品退火时的晶粒长大。因此在铸坯加热、热轧和退火工艺中一个重要目的就是防止析出细小MnS质点，或使钢中的MnS粗化。硫也是产生热脆的主要元素。

（6）铝的影响。铝与硅的作用相似，也可以提高电阻率ρ、缩小γ区。但酸溶铝Al_s（酸溶铝Al_s，是指钢中AlN的铝量和固溶铝，即总铝量减掉Al_2O_3中铝量后剩余的铝量）在0.005%～0.14%范围内时最易形成细小AlN从而阻碍晶粒长大，提高铁损。在$Al_s\leqslant0.003\%$情况下，Al_s越低，成品的晶粒越大，铁损越低，半成品经过消除应力退火时晶粒越容易长大，（100）组分增多，所以$P_{1.5/50}$明显降低。Al_s含量在0.15%以上时起到与提高硅量相同的作用，同时形成粗大AlN，改善织构，降低铁损和使磁各向异性减小。固定氮还可以使磁时效减轻。

（7）氮的影响。氮是有害元素，容易形成细小AlN抑制晶粒长大。N>0.002 5%时使$P_{1.5/50}$明显增高。氮也是产生磁时效的元素。因为室温下氮在α-Fe中的溶解度比碳溶解度低约10倍，所以氮比碳对时效的影响更大。氮含量大于0.012%时，退火后易产生起泡现象，产品报废。因此在铸坯加热、热轧和退火工艺中也要防止析出细小AlN，或使钢中存在的AlN粗化。

（8）氧的作用。氧是有害元素。氧形成的SiO_2，Al_2O_3和MnO等氧化物夹杂使磁性降低。MnO等细小氧化物可阻碍晶粒长大。每提高0.01%O_2，$P_{1.5/50}$可增高约0.07W/kg。氧加速氮在铁中的扩散速度，可间接加速磁时效。硅和铝降低碳和氮在α-Fe中的扩散速度，阻碍磁时效，但氧与硅和铝形成氧化物，因此也促进磁时效。

2.1.1.2 高牌号冷轧无取向电工钢

高牌号冷轧无取向电工钢的硅、锰和铝含量均应按规定控制在一定范围内。牌号越高，有害元素（碳、硫、氮和氧）及钛、锆含量越低，同时锰含量也适当降低。

化学成分对性能的影响与对中低牌号冷轧无取向电工钢性能的影响基本相同，具体作用如下：

（1）铝的影响。铝对磁性起到重要作用。因为铝的作用与硅相似，而对钢强度和硬度的影响又不像硅那样明显。按原子半径顺序：Al<Fe<Si，加铝使铁的晶格畸变比加硅更轻，脆性增加程度小。因此随牌号升高，Si+Al量增加，硅含量最高维持在约3.15%以下，而铝含量逐步提高到约1%。铝的溶解热约为硅的2.5倍，稳定铁素体的作用比硅更强。对Fe-Si-C相图的影响来说，加0.3%Al相当于加0.75%Si。在1.5%Si钢中加0.3%Al就相当于2.3%Si的情况。铝可以使（100）组分增多和（111）组分减少，改善磁性能。但同样要注意避免铝含量处在0.005%～0.14%的不利范围内。

（2）锰的影响。锰可以改善热轧塑性和热轧板组织，因为锰扩大γ相区，使γ—α相变速度减慢。锰含量高，MnS固溶温度提高，铸坯加热温度可以提高到1250℃，便于热轧操作，热轧板厚度偏差小，钢中硫含量也可以适当放宽。锰可以使MnS粗化，有利于晶粒长大。锰也提高产品冲片性和切削性。钢中硫含量降低时，锰含量也相应降低。因为锰降低相变温度，因此可以使退火温度降低。锰提高钢的强度和硬度，但当Si+Al含量提高时会使冷轧性变差。因此随着牌号的升高，锰含量要适当降低。

（3）碳的影响。由于硅含量高，Si+Al>3.5%的高牌号产品要求C≤0.003%。碳量低可使γ相减少或无相变，AlN固溶度降低，钢中的粗大AlN不易固溶，可以防止析出细小AlN，并使最终退火温度提高，促使晶粒长大，磁性

改善。

（4）硫的影响。硫含量降低，铁损明显下降。因此炼钢过程中脱硫是无取向电工钢生产中的一项重要措施。要求硫含量小于0.003%，最好小于0.002%。

（5）磷的影响。随着Si+Al含量增高，磷含量应相应降低，避免出现脆化现象。因此规定$P \leqslant 0.02\%$。

（6）氮的影响。氮含量提高，$P_{1.5/50}$会增高。因此规定1.5%～2.5% Si钢中N≤0.003%，3% Si的高牌号产品N≤0.001 5%。

（7）氧的影响。氧含量提高，$P_{1.5/50}$会增大。高牌号产品的氧含量应控制在小于0.002%。

（8）钛、锆、钒和铌的影响。实践证明，钛和锆等元素由于形成细小稳定的TiC，TiN和ZrN，强烈阻碍晶粒长大，特别是对高牌号的铁损有很坏影响，因此一般要求Ti≤0.008%，Zr≤0.002%。

2.1.2 冷轧无取向电工钢制造工艺

2.1.2.1 中低牌号冷轧无取向电工钢

中低牌号冷轧无取向电工钢通用的制造工艺流程如图2.3-1所示。

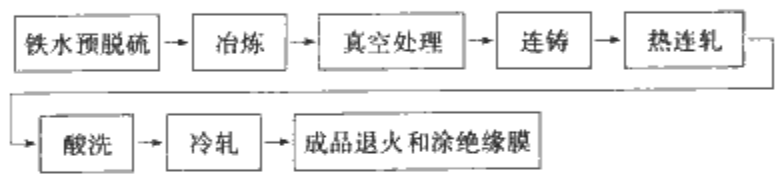


图2.3-1 中低牌号冷轧无取向电工钢制造工艺流程

低牌号冷轧无取向硅钢连铸时可不经过电磁搅拌。在热轧过程中产生α—γ相变，一般采用不经常化的一次冷轧法进行生产。可以采用半成品状态交货。

2.1.2.2 高牌号冷轧无取向电工钢

高牌号冷轧无取向电工钢通用的制造工艺流程如图2.3-2所示。

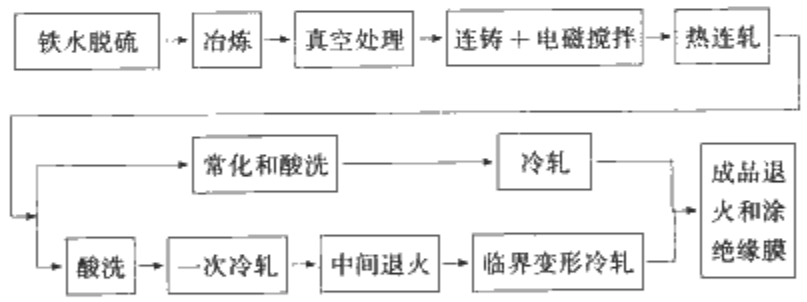


图2.3-2 高牌号冷轧无取向电工钢制造工艺流程

高牌号冷轧无取向电工钢由于铝含量高，钢水流动性差，成品表面缺陷多，性能不稳定；而且由于硅含量高，碳含量低，连铸坯容易形成粗大的柱状晶，产品表面沿轧向出现瓦垅状缺陷，因此连铸时必须经过电磁搅拌以增加铸坯中等轴晶比例，减少内部缺陷。高牌号冷轧无取向电工钢热轧时无相变。

在采用一次冷轧工艺时，高牌号冷轧无取向电工钢的热轧板必须经过常化处理，以使热轧板组织更加均匀，再结晶晶粒增多，防止瓦垅状缺陷，同时使晶粒和析出物粗化，加强（100）和（110）组分以及减弱（111）组分，提高磁性能，特别是B_{5000}值。由于变形抗力大，常采用20辊轧机进行冷轧，并且以小于700rpm的低速轧制。含硅量3%，特别是（Si+Al）≥3.5%时，冷轧前应预热到100～150℃。

2.1.3 冷轧无取向电工钢成品要求

2.1.3.1 相关定义

（1）标准比总铁损。当磁感应强度随时间按正弦规律变化，其峰值为某一标定值，变化频率为某一标定频率时，单位质量的铁心在温度20℃时所消耗的功率定为标准比总铁损（简称标准铁损或铁损），单位为W/kg。

（2）标准磁感应强度。温度为20℃，铁心试样从退磁状态，在标定频率下磁感应强度按正弦规律变化，当交流磁场的峰值达到某一标定值时，铁心试样磁感的峰值为标准磁感应强度（简称磁感应强度或磁感），单位为T。

（3）弯曲次数。弯曲次数是用肉眼观察到基体金属上第一次出现裂纹前反复弯曲的次数，它代表了材料的延展性。

2.1.3.2 牌号表示方法

我国冷轧电工钢的牌号表示方法如图2.3-3所示。

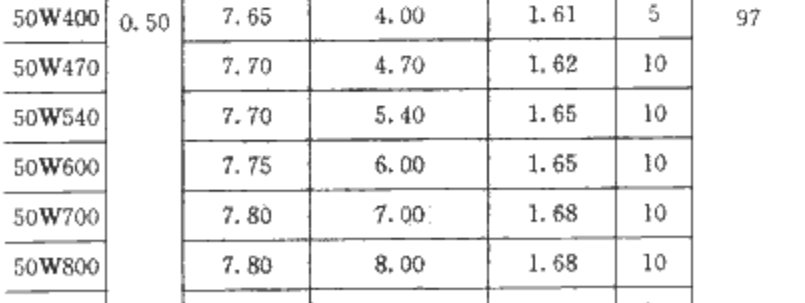


图2.3-3 冷轧电工钢的牌号表示方法

2.1.3.3 成品要求

冷轧无取向电工钢的成品磁性能及工艺特性要求如表2.3-14所示。

表2.3-14 冷轧无取向电工钢成品磁性能及工艺特性

牌号	公称厚度（mm）	理论密度（kg/dm³）	50Hz		最小弯曲次数	最小叠装系数（%）
			最大铁损 $P_{1.5/50}$/(W/kg)	最小磁感 B_{5000}(T)		
35W230	0.35	7.60	2.30	1.60	2	95
35W250		7.60	2.50	1.60	2	
35W270		7.65	2.70	1.60	2	
35W300		7.65	3.00	1.60	3	
35W330		7.65	3.30	1.60	3	
35W360		7.65	3.60	1.61	5	
35W400		7.65	4.00	1.62	5	
35W440		7.70	4.40	1.64	5	
50W230	0.50	7.60	2.30	1.60	2	97
50W250		7.60	2.50	1.60	2	
50W270		7.60	2.70	1.60	2	
50W290		7.60	2.90	1.60	2	
50W310		7.65	3.10	1.60	3	
50W330		7.65	3.30	1.60	3	
50W350		7.65	3.50	1.60	5	
50W400		7.65	4.00	1.61	5	
50W470		7.70	4.70	1.62	10	
50W540		7.70	5.40	1.65	10	
50W600		7.75	6.00	1.65	10	
50W700		7.80	7.00	1.68	10	
50W800		7.80	8.00	1.68	10	
50W1000		7.85	10.00	1.69	10	
50W1300		7.85	13.00	1.69	10	

续表

牌号	公称厚度 (mm)	理论密度 (kg/dm³)	50Hz 最大铁损 $P_{1.5/50}$/(W/kg)	50Hz 最小磁感 B_{5000}(T)	最小弯曲次数	最小叠装系数 (%)
65W600	0.65	7.75	6.00	1.64	10	97
65W700		7.75	7.00	1.65	10	
65W800		7.80	8.00	1.68	10	
65W1000		7.80	10.00	1.68	10	
65W1300		7.85	13.00	1.69	10	
65W1600		7.85	16.00	1.69	10	

注 1. 参考中华人民共和国国家标准 GB/T 2521—1996《冷轧晶粒取向、无取向磁性钢带（片）》。

2. $P_{1.5/50}$表示频率为 50Hz、波形为正弦的磁感峰值为 1.5T 的单位重量铁损值（W/kg）。B_{5000}表示磁场强度最大值为 5000A·m^{-1}时的磁感峰值（T）。

无取向电工钢成品的尺寸、外形要求如下：

（1）厚度。离边部不小于 15mm 所测钢带的厚度允许偏差，横向厚度差应符合表2.3-9的规定。

（2）宽度。剪边交货钢带的宽度允许偏差应符合表 2.3-9的规定。

（3）长度。长度是指由钢带剪切成的钢片长度。钢片长度一般为 2000mm。无取向钢片长度的允许偏差应符合表 2.3-15 的规定。

无取向钢片的不平度不大于 2.0%。钢带的镰刀弯，每 2000mm 不大于 1.0mm。钢带（片）剪边毛刺不大于 0.05mm，对于再分条交货的钢带（片），不大于 0.10mm。

无取向钢带（片）的力学性能应符合表 2.3-16 的规定。

各牌号钢带（片）均应涂敷绝缘涂层。绝缘涂层应能耐绝缘漆、变压器油、机器油等的侵蚀，附着性良好。

表 2.3-15 无取向钢带（片）的尺寸允许偏差 mm

公称宽度	公称厚度	厚度允许偏差	横向厚度差	宽度允许偏差	长度允许偏差
≤150	0.35	±0.04	≤0.02	+0.3 0	+10 0
	0.50	±0.04	≤0.03		
	0.65	±0.05	≤0.03		
>150～500	0.35	±0.04	≤0.02	+0.5 0	+10 0
	0.50	±0.04	≤0.03		
	0.65	±0.05	≤0.03		
>500～1000	0.35	±0.04	≤0.02	+1.50 0	+10 0
	0.50	±0.04	≤0.03		
	0.65	±0.05	≤0.04		
>1000	0.35	±0.04	≤0.03	+1.50 0	+10 0
	0.50	±0.04	≤0.04		
	0.65	±0.05	≤0.04		

续表

表 2.3-16 无取向钢带（片）力学性能

牌号	抗拉强度 σ_b 不小于 (MPa)	伸长率 (%)	牌号	抗拉强度 σ_b 不小于 (MPa)	伸长率 (%)
35W230	450	≥10	50W400	400	≥14
35W250	440		50W470	380	≥16
35W270	430	≥11	50W540	360	
35W300	420		50W600	340	≥21
35W330	410	≥14	50W700	320	≥22
35W360	400		50W800	300	
35W400	390	≥16	50W1000	290	
35W440	380		65W600	340	
50W230	450	≥10	65W700	320	
50W250	450		65W800	300	
50W270	450		65W1000	290	
50W290	440		65W1300	290	
50W310	430	≥11	65W1600	290	
50W330	425				
50W350	420				

注 钢带（片）厚度小于 0.50mm 时，伸长率为 δ_{50}；
钢带（片）厚度大于或等于 0.50mm 时，伸长率为 δ_5。

2.1.4 全工艺冷轧无取向电工钢产品标准

目前冷轧无取向电工钢的生产国家主要有中国、日本、美国、俄罗斯、德国、英国等。我国冷轧无取向电工钢的主要生产厂家有武汉钢铁（集团）公司、宝山钢铁股份有限公司、太原钢铁（集团）有限公司和鞍山钢铁集团公司，产量均在逐年增大。

（1）国际电工委员会。根据 CEI IEC 60404-8-4—1998《全工艺冷轧无取向电工钢技术标准》的规定，冷轧无取向电工钢的磁性能及工艺特性见表 2.3-17。

表 2.3-17 CEI IEC 60404-8-4—1998 规定的冷轧无取向电工钢磁性能及工艺特性

牌号	厚度 (mm)	最大铁损 (W/kg) $P_{1.5/50}$	最大铁损 (W/kg) $P_{1.5/60}$	最小磁感 (T) B_{2500}	最小磁感 (T) B_{5000}	最小磁感 (T) $B_{10\,000}$	最大各向异性损耗 (%)	最小叠装系数	最小弯曲次数	常规密度 (kg/dm³)
M230-35A 5	0.35	2.30	2.90	1.49	1.60	1.70	±17	0.95	2	7.60
M235-35A 5		2.35	2.97	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.60
M250-35A 5		2.50	3.14	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.60
M270-35A 5		2.70	3.36	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.65
M300-35A 5		3.00	3.74	1.49	1.60	1.70	±17		3	7.65
M330-35A 5		3.30	4.12	1.49	1.60	1.70	±17		3	7.65
M360-35A 5		3.60	4.55	1.49	1.60	1.70	±17		3	7.65

续表

牌号	厚度(mm)	最大铁损(W/kg)		最小磁感(T)			最大各向异性损耗(%)	最小叠装系数	最小弯曲次数	常规密度(kg/dm³)
		$P_{1.5/50}$	$P_{1.5/60}$	B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$				
M250-50A 5	0.50	2.50	3.21	1.49	1.60	1.70	±17	0.97	2	7.60
M270-50A 5		2.70	3.47	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.60
M290-50A 5		2.90	3.71	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.60
M310-50A 5		3.10	3.95	1.49	1.60	1.70	±14		3	7.65
M330-50A 5		3.30	4.20	1.49	1.60	1.70	±14		3	7.65
M350-50A 5		3.50	4.45	1.50	1.60	1.70	±12		5	7.65
M400-50A 5		4.00	5.10	1.53	1.63	1.73	±12		5	7.70
M470-50A 5		4.70	5.90	1.54	1.64	1.74	±10		10	7.70
M530-50A 5		5.30	6.66	1.56	1.65	1.75	±10		10	7.70
M600-50A 5		6.00	7.53	1.57	1.66	1.76	±10		10	7.75
M700-50A 5		7.00	8.79	1.60	1.69	1.77	±10		10	7.80
M800-50A 5		8.00	10.06	1.60	1.70	1.78	±10		10	7.80
M940-50A 5		9.40	11.84	1.62	1.72	1.81	±8		10	7.85
M1000-50A 5		10.00	11.90	1.62	1.72	1.81	±8		10	7.85
M310-65A 5	0.65	3.10	4.08	1.49	1.60	1.70	±15	0.97	2	7.60
M330-65A 5		3.30	4.30	1.49	1.60	1.70	±15		2	7.60
M350-65A 5		3.50	4.57	1.49	1.60	1.70	±14		2	7.60
M400-65A 5		4.00	5.20	1.52	1.62	1.72	±14		2	7.65
M470-65A 5		4.70	6.13	1.53	1.63	1.73	±12		5	7.65
M530-65A 5		5.30	6.84	1.54	1.64	1.74	±12		5	7.70
M600-65A 5		6.00	7.71	1.56	1.66	1.76	±10		10	7.75
M700-65A 5		7.00	8.98	1.57	1.67	1.76	±10		10	7.75
M800-65A 5		8.00	10.26	1.60	1.70	1.78	±10		10	7.80
M1000-65A 5		10.00	12.77	1.61	1.71	1.80	±10		10	7.80
M600-100A 5	1.00	6.00	8.14	1.53	1.63	1.72	±10	0.98	2	7.60
M700-100A 5		7.00	9.38	1.54	1.64	1.73	±8		3	7.65
M800-100A 5		8.00	10.70	1.56	1.66	1.75	±6		5	7.70
M1000-100A 5		10.00	13.39	1.58	1.68	1.76	±6		10	7.80
M1300-100A 5		13.00	17.34	1.60	1.70	1.78	±6		10	7.80

(2) 欧洲。根据 BS EN 10106—1996《全工艺冷轧无取向电工钢》的规定，冷轧无取向电工钢的磁性能及工艺特性见表2.3-18。

表 2.3-18　　BS EN 10106—1996 规定的冷轧无取向电工钢磁性能及工艺特性

牌号		厚度(mm)	最大铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	最小磁感(T)			最大损耗各向异性(%)	最小叠装系数	最小弯曲次数	常规密度(kg/dm³)
EN10027-1	EN10027-2			B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$				
M235-35A	1.0890	0.35	2.35	1.49	1.60	1.70	±17	0.95	2	7.60
M250-35A	1.0800		2.50	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.60
M270-35A	1.0801		2.70	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.65
M300-35A	1.0803		3.00	1.49	1.60	1.70	±17		3	7.65
M330-35A	1.0804		3.30	1.49	1.60	1.70	±17		3	7.65
M250-50A	1.0891	0.50	2.50	1.49	1.60	1.70	±17	0.97	2	7.60
M270-50A	1.0806		2.70	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.60
M290-50A	1.0807		2.90	1.49	1.60	1.70	±17		2	7.60
M310-50A	1.0808		3.10	1.49	1.60	1.70	±14		3	7.65
M330-50A	1.0809		3.30	1.49	1.60	1.70	±14		3	7.65
M350-50A	1.0810		3.50	1.50	1.60	1.70	±12		5	7.65

续表

牌号		厚度 (mm)	最大铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	最小磁感 (T)			最大损耗各向异性 (%)	最小叠装系数	最小弯曲次数	常规密度 (kg/dm³)
EN10027-1	EN10027-2			B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$				
M400-50A	1.0811	0.50	4.00	1.53	1.63	1.73	±12	0.97	5	7.70
M470-50A	1.0812		4.70	1.54	1.64	1.74	±10		10	7.70
M530-50A	1.0813		5.30	1.56	1.65	1.75	±10		10	7.70
M600-50A	1.0814		6.00	1.57	1.66	1.76	±10		10	7.75
M700-50A	1.0815		7.00	1.60	1.69	1.77	±10		10	7.80
M800-50A	1.0816		8.00	1.60	1.70	1.78	±10		10	7.80
M940-50A	1.0817		9.40	1.62	1.72	1.81	±8		10	7.85
M310-65A	1.0892	0.65	3.10	1.49	1.60	1.70	±15	0.97	2	7.60
M330-65A	1.0819		3.30	1.49	1.60	1.70	±15		2	7.60
M350-65A	1.0820		3.50	1.49	1.60	1.70	±14		2	7.60
M400-65A	1.0821		4.00	1.52	1.62	1.72	±14		2	7.65
M470-65A	1.0823		4.70	1.53	1.63	1.73	±12		5	7.65
M530-65A	1.0824		5.30	1.54	1.64	1.74	±12		5	7.70
M600-65A	1.0825		6.00	1.56	1.66	1.76	±10		10	7.75
M700-65A	1.0826		7.00	1.57	1.67	1.76	±10		10	7.75
M800-65A	1.0827		8.00	1.60	1.70	1.78	±10		10	7.80
M1000-65A	1.0829		10.00	1.61	1.71	1.80	±10		10	7.80
M600-100A	1.0893	1.00	6.00	1.53	1.63	1.72	±10	0.98	2	7.60
M700-100A	1.0894		7.00	1.54	1.64	1.73	±8		3	7.65
M800-100A	1.0895		8.00	1.56	1.66	1.75	±6		5	7.70
M1000-100A	1.0896		10.00	1.58	1.68	1.76	±6		10	7.80
M1300-100A	1.0897		13.00	1.60	1.70	1.78	±6		10	7.80

(3) 美国。根据 ASTM A 677/A 677M—1999《全工艺冷轧无取向电工钢技术标准》的规定，冷轧无取向电工钢的磁性能见表 2.3-19、表 2.3-20 和表 2.3-21。

表 2.3-19 ASTM A 677/A 677M—1999 规定的爱泼斯坦试样①在 15kG [1.5T]、60Hz 时的最大铁损

0.36mm [0.0140in.] 厚度		0.47mm [0.0185in.] 厚度		0.64mm [0.0250in.] 厚度	
牌号	最大铁损 (W/kg [W/lb])	牌号	最大铁损 (W/kg [W/lb])	牌号	最大铁损 (W/kg [W/lb])
36F145	3.20 [1.45]	—	—	—	—
36F155	3.42 [1.55]	47F165	3.64 [1.65]	64F200	4.41 [2.00]
36F165	3.64 [1.65]	47F180	3.97 [1.80]	64F210	4.63 [2.10]
36F175	3.86 [1.75]	47F190	4.19 [1.90]	64F225	4.96 [2.25]
36F185	4.08 [1.85]	47F200	4.41 [2.00]	64F235	5.18 [2.35]
36F195	4.30 [1.95]	47F210	4.63 [2.10]	64F250	5.51 [2.50]
36F205	4.52 [2.05]	47F240	5.29 [2.40]	64F275	6.06 [2.75]
—	—	47F280	6.17 [2.80]	64F320	7.05 [3.20]
—	—	47F400	8.82 [4.00]	64F500	11.02 [5.00]
—	—	47F450	9.92 [4.50]	64F550	12.13 [5.00]

① 测试试样一半沿平行于钢带轧制方向剪取，一半沿垂直于钢带轧制方向剪取。

表 2.3-20 ASTM A 677/A 677M—99 规定的爱泼斯坦试样在 15kG [1.5T]、60Hz 时的磁导率峰值

0.014in. [0.36mm] 厚度		0.0185in. [0.47mm] 厚度		0.025in. [0.64mm] 厚度	
牌号	典型磁导率峰值	牌号	典型磁导率峰值	牌号	典型磁导率峰值
36F145	700～1100	—	—	—	—
36F155	750～1150	47F165	800～1200	64F200	800～1250
36F165	800～1200	47F180	800～1250	64F210	800～1300
36F175	1000～1600	47F190	800～1650	64F225	800～1700
36F185	1000～1650	47F200	800～1700	64F235	800～1750
36F195	1000～1700	47F210	800～1750	64F250	800～1800
36F205	1000～2000	47F240	900～2050	64F275	900～2100
—	—	47F280	900～2150	64F320	950～2200
—	—	47F400	1500～2250	64F500	1500～2300
—	—	47F450	1500～2400	64F550	1500～2500

(4) 俄罗斯。根据 ГОСТ 21427.2—1988《冷轧无取向电工钢薄板技术条件》的规定，冷轧无取向电工钢的磁性能见表 2.3-22。

表 2.3-21 ASTM A 677/A 677M—1999 规定的爱泼斯坦试样在 15kG [1.5T]、60Hz 时的典型交流励磁电流值

0.36mm [0.014in.] 厚度		0.47mm [0.0185in.] 厚度		0.64mm [0.0250in.] 厚度	
牌号	典型交流励磁电流值 (VA/kg [VA/lb])	牌号	典型交流励磁电流值 (VA/kg [VA/lb])	牌号	典型交流励磁电流值 (VA/kg [VA/lb])
36F145	24.3～28.7 [11.0～13.0]	—	—	—	—
36F155	23.1～27.6 [10.5～12.5]	47F165	22.0～26.5 [10.0～12.0]	64F200	20.9～26.5 [9.5～12.0]
36F165	22.0～26.5 [10.0～12.0]	47F180	20.9～26.5 [9.5～12.0]	64F210	19.8～26.5 [9.0～12.0]
36F175	17.6～22.0 [8.0～10.0]	47F190	16.5～26.5 [7.5～12.0]	64F225	16.5～26.5 [7.5～12.0]
36F185	16.5～22.0 [7.5～10.0]	47F200	15.4～26.5 [7.0～12.0]	64F235	15.4～26.5 [7.0～12.0]
36F195	16.5～22.0 [7.5～10.0]	47F210	15.4～26.5 [7.0～12.0]	64F250	15.4～26.5 [7.0～12.0]
36F205	14.3～22.0 [6.5～10.0]	47F240	13.2～24.3 [6.0～11.0]	64F275	13.2～24.3 [6.0～11.0]
—	—	47F280	12.1～24.3 [5.5～11.0]	64F320	12.1～23.1 [5.5～10.5]
—	—	47F400	12.0～15.4 [5.5～7.0]	64F500	12.1～15.4 [5.5～7.0]
—	—	47F450	11.0～15.4 [5.5～7.0]	64F550	11.0～15.4 [5.0～7.0]

表 2.3-22 ГОСТ 21427.2—1988 规定的冷轧无取向电工钢磁性能

牌号	厚度 (mm)	铁损 (W/kg)		磁感应强度 (T)	
		$P_{1.0/50}$	$P_{1.5/50}$	B_{1000}	B_{2500}
2011	0.65	3.8	9.0	1.48	1.60
	0.50	3.5	8.0	1.49	1.60
2012	0.65	3.6	8.0	1.50	1.62
	0.50	2.9	6.5	1.50	1.62
2013	0.65	3.1	7.0	1.53	1.64
	0.50	2.5	5.6	1.54	1.65
2014	0.50	2.2	5.0	1.52	1.62
2111	0.65	4.3	10.0	1.45	1.58
	0.50	3.5	8.0	1.46	1.58
2112	0.65	3.5	8.0	1.46	1.56
	0.50	2.6	6.0	1.46	1.56
2211	0.65	3.0	7.0	1.40	1.56
	0.50	2.6	5.8	1.40	1.56
2212	0.65	2.6	6.3	1.42	1.58
	0.50	2.2	5.0	1.42	1.60
2311	0.65	2.5	5.8	1.36	1.52
	0.50	1.9	4.4	1.38	1.56
2312	0.65	2.4	5.6	1.38	1.54
	0.50	1.75	4.0	1.40	1.56
2411	0.50	1.6	3.6	1.37	1.49
	0.35	1.3	3.0	1.37	1.50
2412	0.50	1.3	3.1	1.35	1.50
	0.35	1.15	2.7	1.35	1.50
2413	0.50	—	2.9	1.35	1.50
	0.35	—	2.5	1.35	1.50
2421	0.28	$P_{1.0/400}$ 19.5	$P_{0.75/400}$ 10.7	1.35	1.47

（5）日本。根据 JISC 2552—2000《冷轧无取向电工钢》的规定，冷轧无取向电工钢的磁性能及工艺特性见表 2.3-23。

表 2.3-23 JISC 2552—2000 规定的冷轧无取向电工钢磁性能及工艺特性

牌号	厚度 (mm)	密度 (kg/dm³)	最大铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	最小磁感 B_{5000} (T)	最小弯曲次数	最小叠装系数 (%)
35A210	0.35	7.60	2.10	1.60	2	95.0
35A230		7.60	2.30	1.60	2	
35A250		7.60	2.50	1.60	2	
35A270		7.65	2.70	1.60	2	
35A300		7.65	3.00	1.60	3	
35A360		7.65	3.60	1.61	3	
35A440		7.70	4.40	1.64	3	
50A230	0.50	7.60	2.30	1.60	2	96.0
50A250		7.60	2.50	1.60	2	
50A270		7.60	2.70	1.60	2	
50A290		7.60	2.90	1.60	2	
50A310		7.65	3.10	1.60	3	
50A350		7.65	3.50	1.60	5	
50A400		7.65	4.00	1.61	5	
50A470		7.70	4.70	1.62	10	
50A600		7.75	6.00	1.65	10	
50A700		7.80	7.00	1.68	10	
50A800		7.80	8.00	1.68	10	
50A1000		7.85	10.00	1.69	10	
50A1300		7.85	13.00	1.69	10	
65A800	0.65	7.80	8.00	1.66	10	97.0
65A1000		7.80	10.00	1.68	10	
65A1300		7.85	13.00	1.69	10	
65A1600		7.85	16.00	1.69	10	

（6）国内厂家。

1）武汉钢铁（集团）公司。武汉钢铁（集团）公司生产的冷轧无取向电工钢产品囊括了高、中、低三类牌号。根据武汉钢铁（集团）公司企业标准 Q/WG（GG）05-2004《冷轧无取向电工钢带（片）》的规定，武汉钢铁（集团）公

司冷轧无取向电工钢的磁性能及工艺特性见表 2.3-24。

表 2.3-24 Q/WG (GG) 05-2004 规定的冷轧无取向电工钢磁性能及工艺特性

牌号	公称厚度 (mm)	理论密度 (kg/dm³)	最大铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	最小磁感 B_{5000} (T)	最少弯曲次数	最小叠装系数 (%)
35WW230	0.35	7.60	2.30	1.62	2	95.0
35WW250		7.60	2.50	1.62	2	
35WW270		7.65	2.70	1.62	2	
35WW300		7.65	3.00	1.62	5	
35WW360		7.65	3.60	1.63	5	
35WW400		7.65	4.00	1.63	5	
35WW440		7.70	4.40	1.65	5	
50WW230	0.50	7.60	2.30	1.62	2	97.0
50WW250		7.60	2.50	1.62	2	
50WW270		7.60	2.70	1.62	2	
50WW290		7.60	2.90	1.62	3	
50WW310		7.65	3.10	1.62	5	
50WW350		7.65	3.50	1.62	5	
50WW400		7.65	4.00	1.63	10	
50WW470		7.70	4.70	1.64	10	
50WW600		7.75	6.00	1.66	10	
50WW700		7.80	7.00	1.67	10	
50WW800		7.80	8.00	1.68	10	
50WW1000		7.85	10.00	1.70	10	
50WW1300		7.85	13.00	1.72	10	

2) 宝山钢铁股份有限公司。宝山钢铁股份有限公司生产的冷轧无取向电工钢产品以中低牌号为主。根据宝山钢铁股份有限公司企业标准 Q/BQB 480—2003《冷轧无取向电工钢带》的规定，宝山钢铁股份有限公司冷轧无取向电工钢的磁性能及工艺特性见表 2.3-25。

表 2.3-25 Q/BQB 480—2003 规定的冷轧无取向电工钢磁性能及工艺特性

牌 号	公称厚度 (mm)	理论密度 (kg/dm³)	最大铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	最小磁感 B_{5000} (T)	最小叠装系数 (%)
B35A440	0.35	7.70	4.40	1.64	95.0
B35A550		7.75	5.50	1.66	
B50A470	0.50	7.70	4.70	1.62	97.0
B50A540		7.70	5.40	1.65	
B50A600		7.75	6.00	1.65	
B50A700		7.80	7.00	1.68	
B50A800		7.80	8.00	1.68	
B50A1000		7.85	10.00	1.69	
B50A1300		7.85	13.00	1.69	
B65A600	0.65	7.75	6.00	1.64	97.0
B65A700		7.75	7.00	1.65	
B65A800		7.80	8.00	1.66	
B65A1000		7.80	10.00	1.68	
B65A1300		7.85	13.00	1.69	
B65A1600		7.85	16.00	1.69	

3) 太原钢铁（集团）有限公司。太原钢铁（集团）有限公司生产的冷轧无取向电工钢产品以中高牌号为主。根据太原钢铁股份有限公司企业标准的规定，太原钢铁（集团）有限公司冷轧无取向电工钢的磁性能见表 2.3-26 和表 2.3-27。

表 2.3-26 太原钢铁（集团）有限公司企业标准规定的冷轧无取向电工钢磁性能典型值

牌号	厚度 (mm)	密度 (kg/dm³)	铁损 (W/kg)				磁感 (T)	
			$P_{1.0/50}$	$P_{1.5/50}$	$P_{1.0/60}$	$P_{1.5/60}$	B_{2500}	B_{5000}
50TW290	0.50	7.60	1.11	2.61	1.43	3.35	1.57	1.66
50TW310		7.65	1.18	2.71	1.51	3.47	1.58	1.67
50TW350		7.65	1.19	2.74	1.52	3.50	1.59	1.68
50TW400		7.65	1.32	3.02	1.69	3.87	1.60	1.69
50TW470		7.70	1.64	3.64	2.09	4.64	1.58	1.67
50TW600		7.75	1.75	3.84	2.25	4.95	1.60	1.69
50TW800		7.80	2.37	5.11	3.02	6.54	1.62	1.70

表 2.3-27 太原钢铁（集团）有限公司企业标准规定的冷轧无取向电工钢产品性能保证值

牌号	厚度 (mm)	密度 (kg/dm³)	最大铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	最小磁感 B_{5000} (T)	最小弯曲次数	最小叠装系数 (%)
50TW290	0.50	7.60	2.90	1.62	3	97
50TW310		7.65	3.10	1.62	5	
50TW350		7.65	3.50	1.62	5	
50TW400		7.65	4.00	1.63	10	
50TW470		7.70	4.70	1.64	10	
50TW600		7.75	6.00	1.66	10	
50TW800		7.80	8.00	1.68	10	

4) 鞍山钢铁集团公司。鞍山钢铁集团公司生产的冷轧无取向电工钢产品以中低牌号为主。根据鞍山钢铁集团公司企业标准 Q/ASB13—2004《冷轧无取向电工钢带》的规定，鞍山钢铁集团公司冷轧无取向电工钢的磁性能及工艺特性见表 2.3-28。

表 2.3-28 Q/ASB 13—2004 规定的冷轧无取向电工钢磁性能及工艺特性

牌号	公称厚度 (mm)	理论密度 (kg/dm³)	最大铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	最小磁感 B_{5000} (T)	最少弯曲次数	最小叠装系数 (%)
35AW440	0.35	7.70	4.20	1.64	5	95.0
35AW550		7.75	5.30	1.66	5	
50AW470	0.50	7.70	4.50	1.62	10	97.0
50AW540		7.70	5.20	1.65	10	
50AW600		7.75	5.80	1.65	10	
50AW700		7.80	6.50	1.68	10	
50AW800		7.80	7.50	1.68	10	
50AW1000		7.85	9.00	1.69	10	
50AW1300		7.85	11.50	1.69	10	
65AW600	0.65	7.75	5.80	1.64	10	97.0
65AW700		7.75	6.80	1.65	10	
65AW800		7.80	7.75	1.66	10	
65AW1000		7.80	8.85	1.68	10	
65AW1300		7.85	11.50	1.69	10	
65AW1600		7.85	15.00	1.69	10	

2.1.5 半工艺冷轧无取向电工钢技术标准

冷轧无取向电工钢有部分是以半工艺产品出厂。其工艺要点如下：生产厂将冷轧带不完全退火（650～700℃×1～2min）出厂（可不涂绝缘膜），或不完全退火后再经3%～10%临界变形冷轧，或经0.5%～2.0%平整改善板型。对于低碳低硅电工钢可以提高硬度和冲片性。用户再将半成品钢带经高速冲床冲片和去油，进行完全退火后使用。这种工艺能够消除冲片过程中产生的应力，促使晶粒长大，提高磁性能，尤其对低牌号冷轧无取向电工钢的作用更为显著。

半工艺产品主要生产国和我国生产厂家的产品主要性能指标如下。

（1）国际电工委员会。根据CEI IEC 60404-8-2—1998《半工艺冷轧电工钢技术标准》的规定，半工艺冷轧无取向电工钢的磁性能及工艺特性见表2.3-29。

表2.3-29 CEI IEC 60404-8-2—1998规定的半工艺冷轧电工钢磁磁性能及工艺特性

牌号	厚度（mm）	热处理参考温度（℃）±10℃	最大铁损（W/kg）		最小磁感（T）			密度（kg/dm³）
			$P_{1.5/50}$	$P_{1.5/60}$	B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$	
M340-50E 5	0.50	840	3.40	4.32	1.54	1.62	1.72	7.65
M390-50E 5		840	3.90	4.97	1.56	1.64	1.74	7.70
M450-50E 5		790	4.50	5.67	1.57	1.65	1.75	7.75
M560-50E 5		790	5.60	7.03	1.58	1.66	1.76	7.80
M390-65E 5	0.65	840	3.90	5.07	1.54	1.62	1.72	7.65
M450-65E 5		840	4.50	5.86	1.56	1.64	1.74	7.70
M520-65E 5		790	5.20	6.72	1.57	1.65	1.75	7.75
M630-65E 5		790	6.30	8.09	1.58	1.66	1.76	7.80

（2）欧洲。根据BS EN 10165—1996《半工艺冷轧电工钢技术标准》的规定，半工艺冷轧无取向电工钢的磁性能及工艺特性见表2.3-30。

表2.3-30 BS EN 10165—1996规定的半工艺冷轧电工钢磁性能及工艺特性

牌号		厚度（mm）	热处理参考温度±10℃（℃）	最大铁损 $P_{1.5/50}$（W/kg）	最小磁感（T）			密度（kg/dm³）
EN10027-1	EN10027-2				B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$	
M340-50E	1.084 1	0.50	840	3.40	1.54	1.62	1.72	7.65
M390-50E	1.084 2		840	3.90	1.56	1.64	1.74	7.70
M450-50E	1.084 3		790	4.50	1.57	1.65	1.75	7.75
M560-50E	1.084 4		790	5.60	1.58	1.66	1.76	7.80
M390-65E	1.084 6	0.65	840	3.90	1.54	1.62	1.72	7.65
M450-65E	1.084 7		840	4.50	1.56	1.64	1.74	7.70
M520-65E	1.084 8		790	5.20	1.57	1.65	1.75	7.75
M630-65E	1.084 9		790	6.30	1.58	1.66	1.76	7.80

（3）美国。根据ASTM A 683/A 683M—1999《半工艺冷轧无取向电工钢技术标准》的规定，半工艺冷轧无取向电工钢的磁性能见表2.3-31、表2.3-32和表2.3-33。

表2.3-31 ASTM A 683/A 683M—99规定的爱泼斯坦试样在15kG［1.5T］、60Hz时的最大铁损

0.47mm（0.0185in）厚度			0.64mm（0.025in）厚度		
牌号	最大铁损		牌号	最大铁损	
	W/lb	W/kg		W/lb	W/kg
47S155	1.55	3.42	64S200	2.00	4.41
47S165	1.65	3.64	64S210	2.10	4.63
47S175	1.75	3.86	64S220	2.20	4.85
47S190	1.90	4.19	64S230	2.30	5.07

表2.3-32 ASTM A 683/A 683M—1999规定的爱泼斯坦试样在15kG［1.5T］、60Hz时的磁导率峰值

0.47mm（0.0185in）厚度		0.64mm（0.025in）厚度	
牌号	磁导率峰值	牌号	磁导率峰值
47S155	1700～2500	64S200	2000～2900
47S165	2000～2900	64S210	2400～3400
47S175	2100～3000	64S220	2400～3400
47S190	2100～3000	64S230	2400～3400

表2.3-33 ASTM A 683/A 683M—1999规定的爱泼斯坦试样在15kG［1.5T］、60Hz时的典型交流励磁电流值

0.47mm（0.0185in.）厚度		0.64mm（0.025in）厚度	
牌号	典型交流励磁电流值（VA/kg［VA/lb］）	牌号	典型交流励磁电流值（VA/kg［VA/lb］）
47S155	8.8～12.1［4.0～5.5］	64S200	8.8～12.1［4.0～5.0］
47S165	7.7～11.0［3.5～5.0］	64S210	7.7～9.9［3.5～4.5］
47S175	7.7～11.0［3.5～5.0］	64S220	7.7～9.9［3.5～4.5］
47S190	7.7～11.0［3.5～5.0］	64S230	7.7～9.9［3.5～4.5］

（4）国内厂家。根据宝山钢铁股份有限公司企业标准BZJ481—2005《半工艺冷轧无取向电工钢带》的规定，宝山钢铁股份有限公司冷轧半工艺无取向电工钢的磁性能及工艺特性能见表2.3-34。

表2.3-34 BZJ481-2005规定的半工艺冷轧无取向电工钢磁性能及工艺特性

牌号	公称厚度（mm）	理论密度（kg/dm³）	最大铁损 $P_{1.5/50}$（W/kg）	最小磁感 B_{5000}（T）	最小叠装系数
BSP-1	0.50	7.80	4.70	1.66	0.95

2.1.6 展望

随着节能和环保要求的提高，电器设备正向高效化、小型化方向发展，因此无取向电工钢的发展方向是高效电机使用的电工钢。高效电机用电工钢的硅含量已从小于或等于1%扩大到了1.5%～3%。我国武汉钢铁（集团）公司、宝山钢铁股份有限公司和太原钢铁（集团）有限公司都在大力净化钢质以改善中低牌号冷轧无取向电工钢的磁性能。日本和欧美已经分别开发了新系列产品。如图2.3-4、图2.3-5分别为日本新日铁和德国EBG公司产品的发展情况。高效电机用电工钢的生产主要采取以下四个措施：

（1）净化钢质，C、S、N等降到0.003%以下，以降低钢板的铁损。

（2）添加有利的晶界富集元素，如 Sn、Sb 等，提高有利织构（100）、（110）的形成以降低铁损，提高磁感应强度。

（3）中低牌号的热轧带卷经常化后进行冷轧，可以改善磁性能。

（4）以半成品出厂，经冲片后再进行退火，使磁性能提高。

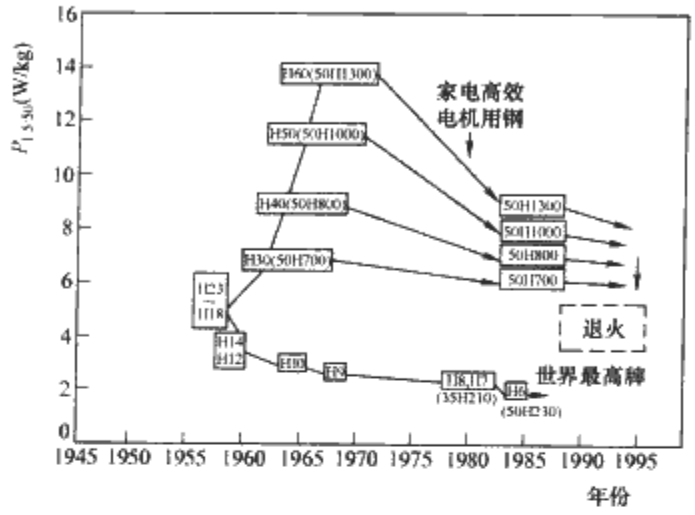


图 2.3-4 日本新日铁产品发展变化

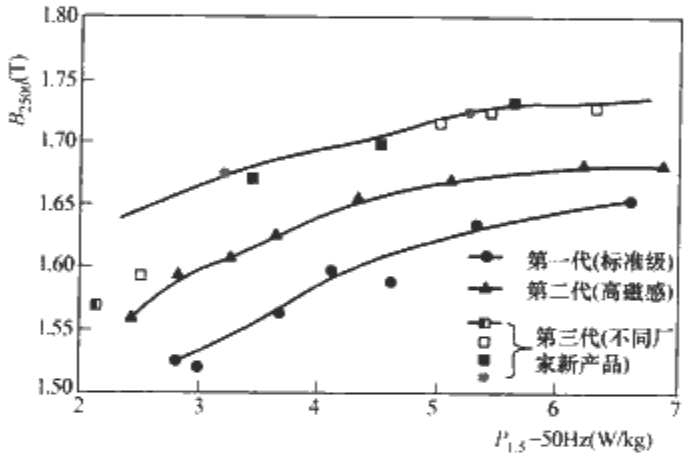


图 2.3-5 德国 EBG 公司产品发展变化

2.2 冷轧无取向硅钢薄带

冷轧无取向电工钢薄带是指含 Si、3%厚度为 0.15mm 和 0.20mm 的一种特殊用途的无取向电工钢，主要用于制做中高频电机、变压器、电抗器和磁屏蔽。

现在已广泛采用 PWM 调频变换器驱动电机来代替通用的开关式（on-off）电机。电机转速从几千 r/min 提高到几万 r/min，使用频率从固定的 50Hz 变为主要在 400～1000Hz 下工作，电机效率明显提高。现在发展的电动汽车（EV）和混合型汽车（HEV）中的电机、计算机全轴微电机、手机中的微电机、高速印刷机、办公室电脑等微电机也都用 PWM 驱动。从而要求无取向电工钢 $P_{1.5/50}$ 更低，并且 0.35～0.15mm 厚的薄规格产品用量增多。国外在 70 年代前后已经开始生产冷轧无取向电工钢薄带。武汉钢铁（集团）公司于 1989 年研制成了 0.2mm×1000mm（厚×宽）的 WT200 和 WTG200 牌号，1990 年研制成了厚为 0.15mm 的 WTG150 牌号。产品铁损低，无时效、叠片系数高、厚度均匀，板型好，达到了日本同类产品的水平。

2.2.1 冷轧无取向硅钢薄带的制取

冷轧无取向硅钢薄带的化学成分和生产工艺与高牌号冷轧无取向电工钢基本相同。

由于产品厚度剪薄，因此必须更加严格地控制板型和表面质量。热轧带经常化后采用一次冷轧法或二次中等压下率冷轧法。二次冷轧法更容易获得良好板型，但磁性能比一次冷轧法更低。

2.2.2 冷轧无取向硅钢薄带成品要求

2.2.2.1 国际电工委员会的技术要求

根据 CEI IEC404-8-8—1991《中频下使用的磁性薄钢带技术标准》的规定，冷轧无取向硅钢薄带的磁性能及工艺特性见表 2.3-35。

表 2.3-35 CEI IEC404-8-8—1991 规定的冷轧无取向硅钢薄带的磁性能及工艺特性

牌号	公称厚度（mm）	最大铁损（W/kg）		最小叠装系数	最少弯曲次数
		1.0T	频率（Hz）		
NO5	0.05	45	1000	0.88	2
NO10	0.10	13	400	0.91	2
NO15	0.15	14	400	0.92	2
NO20	0.20	15①	400	0.93①	2

① 是无涂层试验试样测试的值。

2.2.2.2 国内对冷轧无取向硅钢薄带的技术要求

根据武汉钢铁（集团）公司企业标准 Q/WG（GG）08—1992《冷轧无取向硅钢薄带》的规定，冷轧无取向电工钢硅钢薄带的磁性能及工艺特性见表 2.3-36。

表 2.3-36 Q/WG（GG）08—1992 规定的冷轧无取向硅钢薄带磁性能及工艺特性

牌号	公称厚度（mm）	理论密度（kg/dm³）	频率（Hz）	最大铁损		最小磁感（T）		最小叠装系数（%）
				B（T）	P（W/kg）	B_{800}	B_{2000}	
WTG150	0.15	7.65	1000	0.5	15.5	1.34	1.43	91
WTG200	0.20		400	1.0	15.0	1.37	1.47	92
WT200	0.20		400	1.0	17.0	1.45	1.56	93

2.3 热轧硅钢

热轧硅钢片是用于制造电机等电力工业的原材料，其主要用途为家用电机、微电机、Y 系列小电机和部分中型电机、低压电器及仪表用电源变压器等。1903 年美国取得了英国人哈德菲尔特于 1882 年发明的硅钢专利使用权，并于同年在美国和德国开始生产热轧硅钢片，迄今已有 100 多年历史。国际上热轧硅钢片生产最兴旺时期为 20 世纪 30～50 年代。美、英、日等国从 20 世纪 60 年代开始相继停产，前西德于 1975 年停产，前苏联于 1987 年也停止生产。

我国从 1954 年由太原钢铁公司首先生产热轧硅钢片到现在已有 50 多年历史，但是随着我国“以冷代热”政策的出台，太原钢铁公司、鞍山钢铁集团公司、首都钢铁集团公司现均已退出热轧硅钢生产。目前，国内生产热轧硅钢的厂家以上海矽钢片厂为首共 14 家，49 台轧机，生产的主要牌号以 DR510 牌号为主，年生产能力为 100 万 t 左右。其中，上海矽钢、江西新余、苏州吴中、江苏铁本、浙江诸暨五家企业年产达 10 万 t 以上。

国内热轧硅钢片生产工艺经过不断改进，产品的磁性、尺寸公差和表面质量都有很大改善。如一次加热轧制、α 单相区低温退火、热轧后快冷、氢气退火、酸碱洗氧化处理等。特别是在磁性方面，与美、德等国淘汰热轧硅钢片生产前的产品相比，国内一般产品的磁性水平相当于当时国外最高牌号。

2.3.1 热轧硅钢特点

热轧硅钢生产工艺相对简单，而且市场价格比较低，一直在硅钢市场占据一定的份额。但是，由于受热轧硅钢片生产工艺方法和设备的限制，其综合质量水平与冷轧无取向电工钢相比存在一定差距，而且这些差距是难以克服的。主要缺点为：

（1）磁性能低。硅含量和厚度相同时，热轧硅钢的磁性一般低于冷轧无取向电工钢。并且改善热轧硅钢磁性的潜力不大，磁性很难进一步提高。

（2）磁性波动大。同一冶炼炉号和在同一退火的板垛中，产品磁性可差1～2个牌号，甚至差3个牌号。这是因为：

1）热轧板厚度公差（±0.05mm）比冷轧板（±0.03mm）大。根据上海矽钢片厂实验结果，厚度变化0.01mm，$P_{1.0}$相应波动约0.07W/kg，而对$P_{1.5}$的影响更大。

2）热轧硅钢片的成品厚度是由8片叠轧而成，每组上下2片钢板（俗称表皮）比内部6片钢板氧化严重，即使内部6片其氧化程度也不同。氧化严重的钢片铁损$P_{1.0}$明显增高，同时磁感降低。

3）采用成垛退火方式，无论是在罩式炉或隧道式炉中，整垛料上下、边部与中部均存在较大温差，造成磁性不均匀。

（3）钢板厚度不均，同板差大。影响因素包括热轧时轧辊辊型、轧机弹性变形、坯料厚度变化、叠轧后头尾厚度不均匀造成温差等。

（4）钢板不平度及内应力影响较大。热轧硅钢片的不平度为6～10mm，而冷轧电工钢板只为1～3mm，这也是热轧板叠片系数低于冷轧板的原因之一。此外，热轧硅钢片内应力较大，冲片后冲片形状畸变和尺寸偏差大。

（5）表面氧化、不光滑。热轧硅钢退火后一般不经酸洗，表面有不同程度的氧化铁皮，造成钢板表面粗糙。氧化铁皮虽有一定绝缘作用，但绝缘性不高，用户冲片后常需要再涂绝缘漆。

（6）不能成卷供货。由于生产的硅钢片不成卷，不能采用高速自动冲床冲片，因而降低了钢板利用率。

（7）生产工人的劳动条件差，高温操作，空气污染严重，劳动强度大。

2.3.2 成分要求

热轧硅钢按硅含量多少分为低硅钢（电机钢，硅含量＜2.8%）和高硅钢（变压器钢，硅含量＞2.8%）。目前热轧高硅钢已经全部被冷轧取向硅钢所代替，因此，以下介绍热轧低硅钢的成分要求，其冶炼化学成分如表2.3-37。

表2.3-37　　热轧硅钢冶炼化学成分　　%

成分	C	Si	Mn	P	S
范围	0.04～0.06	2.20～2.80	0.30～0.50	≤0.05	≤0.025

化学成分对热轧硅钢性能的影响如下：

（1）硅的影响。热轧硅钢中硅含量对磁性影响十分敏感，一般硅含量在2.20%～2.80%。随硅含量提高，电阻率提高，涡流损耗降低，并且由于硅含量提高使成品晶粒粗大，磁滞损耗降低。

（2）碳的影响。碳是有害元素，除增加矫顽力和磁滞损耗外还将降低磁感。但是冶炼时碳含量过低，将会造成钢中氧含量增高，这也将降低磁性能。冶炼合适碳含量范围是0.04%～0.06%，并在退火时将成品中碳含量降到0.005%～0.01%。碳在钢中存在的形态对磁性也有影响。沿晶界析出的片状大块三次渗碳体对磁性危害性比在晶粒内析出的细小针状渗碳体小。如果碳以石墨状态存在，对磁性影响更小。

（3）锰的影响。锰元素对磁性的影响较小，一般控制在0.5%以下。锰与硫化合形成MnS，可以改善热轧加工性。为防止开坯热轧时开裂，冶炼成分中Mn/S≥10。

（4）磷的影响。磷元素可以提高硅钢电阻率并促进晶粒长大，对降低铁损有利。磷有加强热轧硅钢片表面氧化铁皮附着力的作用，退火后不易产生氧化粘结白膜。但是磷含量过高将容易在开坯和叠轧时出现打滑和弹钢等咬入困难现象，而且增加硅钢片硬度、产生冷脆，对冲片不利。一般热轧电机钢中含P≤0.05%。

（5）硫的影响。硫也是对磁性有害的元素。它不利于晶粒长大，并且提高矫顽力和磁滞损耗。硫对较低牌号热轧硅钢（如DR510以下的产品）磁性影响较小，一般控制在0.015%～0.025%。但对DR420以上高牌号磁性的影响很敏感，要求S＜0.015%。

（6）铜、镍、铬的影响。铜、镍、铬残余元素应尽量低，总含量应控制在0.01%以下。三个元素对磁性的有害影响程度顺序为：Cu＞Cr＞Ni。

（7）氮、氧、氢的影响。氮、氧、氢气体元素对磁性是有害的。氮的有害作用不次于碳。为减少这些气体含量，在转炉冶炼硅钢时采用钢包吹氩处理措施。

2.3.3 生产工艺流程

热轧硅钢一般在正常生产条件下，从板坯入炉到产品入库的生产周期为12～15天。图2.3-6为热轧硅钢生产工艺示意图。

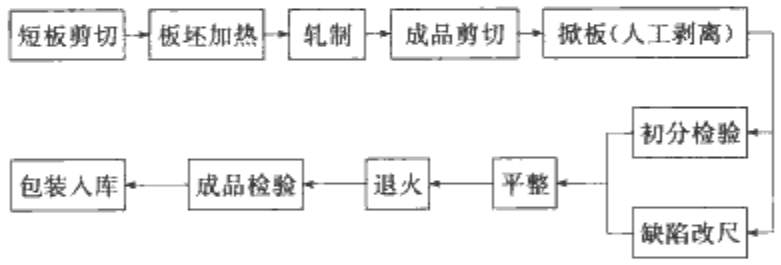


图2.3-6　热轧硅钢生产工艺流程

2.3.4 成品要求

热轧硅钢的成品要求按GB 5212—1985《电工热轧硅钢薄钢板》、ZBH 46002—1990《家用电器用热轧硅钢薄板》。

2.3.4.1 电工热轧硅钢薄钢板

（1）类别、牌号。

1）热轧硅钢按硅含量多少分为低硅钢（硅含量＜2.8%）和高硅钢（硅含量＞2.8%）。

2）硅钢按铁损值、厚度和检验条件不同，区分不同牌号。其牌号、符号意义如下：

DR—表示电工用热轧硅钢板；

G—表示频率为400Hz时在强磁场下检验的钢板；

不含“G”的牌号—表示频率为50Hz时在强磁场下检验的钢板；

字母“DR”后数字—横线以前的数字为铁损值100倍，横线以后的数字为厚度值100倍。

3）电工用热轧硅钢的类别和牌号见表2.3-38。

4）牌号DR530-50执行到1988年底废止。

（2）尺寸、外形。

1）尺寸。钢板的公称尺寸应符合表2.3-38的规定。

表 2.3-38 GB 5212—1985 规定的热轧硅钢板的公称尺寸

mm

分类	检验标准	牌号	钢板厚度	钢板宽度×钢板长度
低硅钢	强磁场	DR530-50	0.50	
		DR510-50	0.50	
		DR490-50	0.50	
		DR450-50	0.50	
		DR420-50	0.50	
		DR400-50	0.50	
高硅钢	强磁场	DR440-50	0.50	600×1200
		DR405-50	0.50	670×1340
		DR360-50	0.50	750×1500
		DR315-50	0.50	810×1620
		DR290-50	0.50	860×1720
		DR265-50	0.50	900×1800
		DR360-35	0.35	1000×2000
		DR325-35	0.35	
		DR320-35	0.35	
		DR280-35	0.35	
		DR255-35	0.35	
		DR225-35	0.35	
	高频率	DR1750G-35	0.35	双方协议
		DR1250G-20	0.20	
		DR1100G-10	0.10	

注 经供需双方协商，可供应表 2.3-38 以外规格的钢板。

2）尺寸允许偏差。钢板的厚度、宽度、长度允许偏差应符合表 2.3-39 的规定。钢板的同板差允许值应符合表 2.3-40 的规定。

表 2.3-39 GB 5212—1985 规定的热轧硅钢板的厚度、宽度、长度允许偏差

mm

钢板厚度	厚度偏差	厚度偏差	长度偏差
0.50	±0.05	≤750：+8	≤1500：+25
0.35	±0.04		
0.20	±0.02	>750：+10	>1500：+30
0.10	±0.02		

注 厚度为 0.42mm 和 0.30mm 的钢板，分别按照 0.50mm 和 0.35mm 的产品规格。

表 2.3-40 GB 5212—1985 规定的热轧硅钢板的同板差

mm

钢板厚度	同板差允许值
0.50	0.06
0.35	0.05
0.20	0.04
0.10	0.03

3）钢板的不平度。钢板的不平度应符合表 2.3-41 规定。

表 2.3-41 GB 5212—1985 规定的热轧硅钢板的不平度 mm

类别	甲级	乙级	丙级
	不大于		
低硅钢	6	12	17
高硅钢	6	12	18

（3）技术要求。

1）交货状态。高硅钢应经酸洗涂层交货，也允许不涂层交货。低硅钢一般不经酸洗交货。

2）电磁性能和工艺性能。电磁性能和反复弯曲次数应符合表 2.3-42 的规定。

表 2.3-42 GB 5212—1985 规定的热轧硅钢板的电磁性能

mm

牌号	厚度（mm）	最小磁感应强度（T）			最大铁损（W/kg）		最低弯曲次数不小于	理论密度 D_2（g/cm³）		叠装系数
		B_{2500}	B_{5000}	B_{10000}	$P_{1.0/50}$	$P_{1.5/50}$		酸洗钢板	未酸洗钢板	
DR530-50	0.50	1.51	1.61	1.74	2.20	5.30		7.75	7.70	提供数据
DR510-50	0.50	1.54	1.64	1.76	2.10	5.10				
DR490-50	0.50	1.56	1.66	1.77	2.00	4.90				
DR450-50	0.50	1.54	1.64	1.76	1.85	4.50				
DR420-50	0.50	1.54	1.64	1.76	1.80	4.20				
DR400-50	0.50	1.54	1.64	1.76	1.65	4.00				
DR440-50	0.50	1.46	1.57	1.71	2.00	4.40	4.0	7.65	—	
DR405-50	0.50	1.50	1.61	1.74	1.80	4.05				
DR360-50	0.50	1.45	1.56	1.68	1.60	3.60	1.0	7.55	—	
DR315-50	0.50	1.45	1.56	1.68	1.35	3.15				
DR290-50	0.50	1.44	1.55	1.67	1.20	2.90				
DR265-50	0.50	1.44	1.55	1.67	1.10	2.65				
DR360-35	0.35	1.46	1.57	1.71	1.60	3.60	5.0	7.65	—	
DR325-35	0.35	1.50	1.61	1.74	1.40	3.25				
DR320-35	0.35	1.45	1.56	1.68	1.35	3.20	1.0	7.55	—	
DR280-35	0.35	1.45	1.56	1.68	1.15	2.80				
DR255-35	0.35	1.44	1.54	1.66	1.05	2.55				
DR225-35	0.35	1.44	1.54	1.66	0.90	2.25				

注 1. 低硅钢板 B_{10000} 不做判定依据，如需保证时，应在合同中注明。

2. $P_{1.0/50}$、$P_{1.5/50}$ 表示当用 50Hz 反复磁化和按正弦形变化的磁感应强度最大值为 1.0 和 1.5 时的总单位铁损（W/kg）。

3. 经供需双方协商，供方应提供磁化曲线。

4. 迭装系数只供参考，暂不作交货条件。

5. 理论密度仅用于计算试样断面积，不作交货条件。

3）表面质量。钢板应剪切整齐，表面平整，不得有气泡、分层、锈蚀、白膜和其他影响使用的缺陷。普通性麻点的深度不得超过钢板厚度偏差，局部性麻点的深度不得超过钢板的厚度公差，其总面积不得大于钢板面积的1%。裂边深入钢板公称尺寸的深度每边不大于4mm，两边对称存在时，其裂边深度之和不大于4mm。经需方同意，硅钢薄板允许有缺角存在，但缺角边长深入钢板公称尺寸的深度不大于钢板直线尺寸的1.5%。经供需双方协议，可供应带有上述缺陷的“未改尺”的钢板。

（4）试验方法。

每批钢板的试验项目、试样数量、取样方法和试验方法应符合表2.3-43的规定。

表2.3-43 GB 5212—1985规定的热轧硅钢板的试验方法

序号	检验项目	试样数量	取样方法	试验方法
1	电磁性能	每批取一套	每张钢板距边缘40mm	GB 3655—1983
2	反复弯曲	纵横各一个		GB 235—1982
3	迭装系数	双方协议		GB 3522—1981
4	尺寸	逐张检查		—
5	表面质量	逐张检查		肉眼检查

2.3.4.2 家用电器用热轧硅钢薄板

（1）牌号表示方法和代号。

1）牌号表示方法。家用电器用热轧硅钢薄板的牌号由代表家用电器用热轧硅钢薄板的汉语拼音字母、铁损值、厚度值等三个部分按顺序组成。如：JDR540-50 JDR510-50。

2）代号。JDR—表示家用电器热轧硅钢薄板的“家”、“电”、“热”汉语拼音字母的组合。

字母JDR后数字—横线以前的数字为铁损值$P_{1.5/50}$的100倍；横线以后的数字为厚度值的100倍。

（2）尺寸、外形。

1）尺寸。钢板的公称尺寸应符合表2.3-44的规定。

表2.3-44 ZBH 46002—1990规定的热轧硅钢板的公称尺寸 mm

厚 度	宽 度	长 度
0.5	600	1200
	670	1340
	750	1500
	810	1620
	860	1720
	900	1800
	1000	2000

注 经供需双方协商，可供应表2.3-44以外的规格的钢板。

2）钢板的同板差允许值及厚度、宽度、长度允许偏差应符合表2.3-45的规定。

表2.3-45 ZBH 46002—1990规定的热轧硅钢板的允许偏差 mm

钢板厚度	同板差允许值	厚度偏差	宽度偏差	长度偏差
0.50	0.06	±0.05	$\leqslant 750\,^{+8}_{0}$	$\leqslant 1500\,^{+25}_{0}$
			$>750\,^{+10}_{0}$	$>1500\,^{+30}_{0}$

3）钢板的不平度。钢板的不平度规定如下：

甲级品——每米不大于5mm；

乙级品——每米不大于10mm；

丙级品——每米不大于17mm。

（3）技术要求。

1）家用电器用热轧硅钢薄板的牌号按表2.3-46的规定。

表2.3-46 ZBH 46002—1990规定的热轧硅钢板的技术要求

牌号	检验条件	最小磁感应强度（T）			最大铁损（W/kg）		理论密度（g/cm³）	叠片系数
		B_{2500}	B_{5000}	$B_{10\,000}$	$P_{1.0/50}$	$P_{1.5/50}$		
JDR580-50	强磁场	1.55	1.65	1.76	2.50	5.80	7.70	—
JDR540-50		1.53	1.63	1.74	2.30	5.40		
JDR525-50		1.52	1.62	1.74	2.20	5.25		
JDR510-50		1.54	1.64	1.76	2.10	5.10		

注 1. B_{10000}不作为判定依据。如需保证时，应在合同中注明。

2. 经供需双方协商，供方应提供磁性曲线。

3. 理论密度是指未酸洗的数值，仅用于计算试样断面积，不作交货条件。

4. 叠装系数应不小于95%。如供方能保证，则可以不作检验。

2）交货状态家用电器用热轧硅钢薄板一般不经酸洗交货。

3）电磁性能和工艺性能。电磁性能应符合表2.3-46的规定。最低弯曲次数不小于10次。

4）表面质量。钢板应剪切整齐，表面平整，不得有气泡、分层、锈蚀和其他影响使用的缺陷。普遍性麻点的深度不得超过钢板厚度偏差，局部性麻点的深度不得超过钢板的厚度公差，其总面积不得大于钢板面积的1%。裂边深入钢板公称尺寸的深度每边不大于4mm，两边对称存在时，其裂边深度之和不大于4mm。经需方同意，硅钢薄板允许有缺角存在。但缺角边长深入钢板公称尺寸的深度不大于钢板直线尺寸的1.5%。经供需双方协议，可供应带有上述缺陷的“未改尺”的钢板。

（4）试验方法。钢板的表面质量用肉眼进行逐张检验。钢板厚度的测量按四点测量。钢板不平度的测量：钢板轻放在平台上，呈自由状态，按正反两面测量，以最大值作为钢板不平度。测量范围从长边角端150mm处算起。硅钢薄板电磁性能的测量应按GB 3655的要求执行。弯曲次数检验应从钢板距边缘40mm处纵横各取一个试样，按GB 235的规定进行。

3 冷轧取向硅钢

通过形变和再结晶退火产生晶粒择优取向的硅铁合金统称为晶粒取向硅钢（以下简称取向硅钢），硅含量约3%，碳含量很低。取向硅钢分为普通取向硅钢（CGO钢）和高磁感取向硅钢（Hi-B钢）两类。均利用了3%Si-Fe多晶体中（110）[001]织构（高斯织构）的取向生核和择优长大机理。

1930年美国戈斯（N. P. Goss）采用冷轧和退火方法探索出晶粒易磁化方向〈001〉平行于轧制方向，经过多次实验，得到3%Si钢沿轧制方向磁性更好的结论。于1934年申请专利并发表。后经X射线检查证实这种材料具有{110}〈001〉织构，易磁化方向〈001〉晶向平行于轧制方向，称为Goss取向硅钢或普通取向硅钢。CGO钢平均位向偏离角约为7°，晶粒直径为3～5mm，磁感B800约

为1.82T。

1953年日本新日铁公司田口悟等发现，经过一次大压下率冷轧和退火工艺，以AlN为主要抑制剂研制出更高磁性的取向硅钢。以AlN＋MnS综合抑制剂的取向硅钢于1964年开始试生产并命名为高磁感取向硅钢（Hi-B钢）。为使磁性更加稳定，1965年后确定采用热轧带高温常化工艺、改进MgO隔离剂、涂应力绝缘涂层等措施使Hi-B钢工艺更加完善。Hi-B钢偏离角约为3°，晶粒直径为10～20mm，B800约为1.92T左右。

取向硅钢产品为冷轧板或带材，公称厚度为0.18mm、0.23mm、0.28mm、0.30mm和0.35mm。主要用于制造电力变压器、配电变压器及大型发电机定子。在输电和配电系统中消耗6%～10%电能，其中约40%消耗在变压器中。变压器总损耗中铁损和铜损各占约50%，而铁损与用以制造铁心的硅钢质量直接相关。取向硅钢晶粒大，特别是Hi-B钢晶粒更大，磁畴尺寸大，而且主要为180°磁畴。铁损中涡流损耗P_e与反常损耗P_a之和比磁滞损耗P_h大1.5～2.0倍，而P_a又比P_e大1～2倍，因此主要目标是降低P_e，特别是P_a。20世纪80年代以来日本采取减薄钢板厚度、提高硅含量（从2.9%～3.1%提高到3.2%～3.4%）和细化磁畴三项技术措施，先后开发了3个CGO钢和3个Hi-B钢新牌号，生产了0.18mm和0.23mm厚的新品种。生产上采用了激光照射和齿状辊加工等细化磁畴技术。

另外，为满足军工和电子工业的需求，开发出冷轧取向硅钢薄带产品。其厚度不大于0.1mm，主要用于不小于400Hz的高频变压器、脉冲变压器、脉冲发电机、大功率磁放大器、通信用的扼流线圈、电感线圈、开关和控制元件、磁屏蔽以及在振动和辐射条件下工作的变压器。

3.1 CGO钢（普通取向硅钢）

3.1.1 成分要求

取向硅钢化学成分要求极其严格，规定的成分范围很窄，成分略有波动对产品性能就有很大影响。

3.1.1.1 基本成分

普通取向硅钢冶炼化学成分见表2.3-47。

表2.3-47 普通取向硅钢冶炼化学成分 %

成分	C	Si	Mn	P	S	Als	N
范围	0.03～0.05	3.1～3.4	0.05～0.10	≤0.03	0.015～0.03	<0.015	<0.006

化学成分对普通取向硅钢性能的影响如下：

（1）碳的影响。CGO钢碳含量规定为0.03%～0.05%。碳含量小于0.03%时，特别是小于0.02%的3.25%硅钢已无相变，铸坯在大于1350℃加热时晶粒明显粗化，热轧带沿板厚方向中心区的形变晶粒粗大，〈110〉纤维织构强，冷轧和脱碳退火后残存有形变晶粒，高温退火后二次再结晶不完全，出现晶粒尺寸不大于1mm和在1～100mm宽地区内沿轧向分布的线状细晶，使磁性降低。

含碳量大于0.03%碳的硅钢经热轧、喷水冷却和550℃卷取后，热轧板中析出细小弥散Fe_3C，它们可以阻碍初次晶粒长大。碳含量高可改善热、冷加工性，防止热轧板产生横裂；冶炼操作容易，炉渣中FeO含量减少，提高钢的回收率和炉衬寿命。但是，碳含量过高，后期脱碳困难，并且使MnS固溶温度提高，使铸坯加热温度提高。

（2）硅的影响。硅含量规定为3.1%～3.4%。硅在α-相中的固溶度比在γ-相中大，每增高0.1%Si时，$P_{1.7}$降低0.019W/kg。近年来日本开发的高牌号CGO钢和Hi-B钢中硅含量控制在3.15%～3.4%，并适当提高碳含量来降低$P_{1.7}$。

（3）锰和硫的影响。MnS是取向硅钢的重要抑制剂。CGO钢中锰含量规定为0.05%～0.10%，硫含量为0.015%～0.03%。锰与硫含量有密切关系，即[Mn%]×[S%]乘积对二次再结晶发展和磁性有很大影响。CGO钢中含0.05%～0.06%Mn时，S<0.005%不发生二次再结晶，初次晶粒尺寸$\bar{d}$大，磁性低。随硫含量增高，即[Mn%]×[S%]值增大，$\bar{d}$减小，二次晶粒尺寸$\bar{D}$增大、取向度W和磁性高。为获得稳定的磁性，最好控制Mn＝0.05%～0.08%，S＝0.018%～0.025%，[Mn%]×[S%]＝(11～19)×10^{-4}，并且控制Mn/S的情况下热轧后析出的细小MnS数量合适，$\bar{d}$＝0.015mm，$\bar{D}$＝3～4mm，W＝85%。

锰、硫或[Mn%]×[S%]乘积过高，铸坯中MnS过于粗大，加热温度提高，晶粒粗化，热轧加工性和磁性降低。热轧析出的细小MnS过多，对二次晶粒长大不利。硫在α-相中固溶度比在γ-相中更高。锰明显降低硫的固溶度，提高加热温度，并有阻碍以后高温净化退火时的脱硫作用。硫含量过高使脱硫也困难。如果硫含量偏上限，锰含量偏下限，即Mn/S比过低时，热轧时易发生热脆。为改善热加工性，Mn/S比控制在3左右。

（4）铝和氮的影响。以MnS为抑制剂的CGO钢，规定Als<0.015%，N<0.006%。因为AlN固溶和析出温度比MnS低，在热轧和以后退火过程中析出细小AlN颗粒，它可弥补固溶不充分的MnS而起辅助抑制作用，脱碳退火后初次晶粒更细小均匀$\bar{d}$≈0.013mm，二次再结晶温度从约950℃提高到约1000℃，二次晶粒尺寸$\bar{D}$＝4～8mm，取向度W≈90%，0.35mm厚板B_{800}≈1.85T，但由于二次晶粒粗大，$P_{1.7}$也较高（1.10～1.15W/kg）。

（5）磷的影响。规定磷含量不大于0.03%，最好不大于0.01%。转炉冶炼时排二次渣可使钢水中磷≈0.006%。磷含量低使热轧板中MnS分布更均匀，磁性好且稳定。CGO钢中磷含量降低，$P_{1.7}$也下降。如果Als<0.003%时二次晶粒小，$P_{1.7}$更低。

3.1.1.2 抑制剂的种类及作用

取向硅钢是通过二次再结晶形成〈110〉〈001〉单一织构。发展完善的二次再结晶组织必须具备以下三个条件：

（1）钢中存在抑制剂阻碍初次再结晶晶粒正常长大，促进二次晶粒反常长大。

（2）初次再结晶晶粒细小均匀，有利于二次晶粒吞并初次晶粒而长大。

（3）具有合适的初次再结晶织构组织，在〈110〉〈001〉二次晶核周围存在许多〈111〉〈112〉位相的初次晶核，有利于二次晶核长大。

为了通过二次再结晶获得单一Goss织构，能够有效抑制初次晶粒正常长大的细小、弥散析出相质点或晶界偏聚元素（称为抑制剂）发挥了关键性作用。以MnS为抑制剂的CGO钢生产过程中，为保证获得稳定的磁性能，必须使浇铸冷凝过程中析出的粗大MnS颗粒完全固溶。因此，CGO钢铸坯加热温度规定为1350～1370℃。铸坯经高于1350℃的高温加热，粗大MnS颗粒完全固溶，在热轧过程中再以细小弥散状态析出。CGO钢脱碳退火后合适的初次晶粒尺寸为15～25μm，这样可以保证二次再结晶完全从而获得高磁性。

不可否认，高温铸坯加热技术是取向硅钢发展史上一个重要的里程碑，是人们充分认识到抑制剂的作用后制定的一种可以稳定获得高磁性能的成熟工艺。但是，近年来，随着能源供应的日益紧张以及对于环保、降低成本要求的不断提高，高温加热的缺点如成材率降低、炉底积渣严重、炉子寿命缩短、制造成本高、产品表面缺陷多、磁性能不稳定等越来越突出地显露出来，降低铸坯加热温度已成为世界各大取向硅钢生产厂关注的技术开发热点。

由于高温铸坯加热技术存在上述缺点，且不利于取向硅钢与其他钢种共用热轧生产线，降低铸坯加热温度势在必行。为实现低温铸坯加热，必须在抑制剂中排除 MnS 或弱化 MnS 的作用，而以 AlN、Cu_2S 等取而代之。这主要是因为 AlN 和 Cu_2S 等的固溶温度比 MnS 低，更适合实现低温加热。

生产 CGO 钢时以 Cu_2S 作为主要抑制剂的生产工艺（俄罗斯上依谢特及新利佩茨克厂、德国 Thyssen、韩国浦项），可以实现降低铸坯加热温度的目的。Cu_2S经 1250～1300℃加热实现完全固溶，热轧过程中析出的细小弥散 Cu_2S质点起到抑制剂作用，而热轧板中残存的粗大 MnS 颗粒不起抑制作用。初次晶粒尺寸介于高温铸坯加热工艺及低温铸坯加热工艺之间（15～25μm）。该项技术可将铸坯加热温度降低至 1250～1300℃。

3.1.2 制造工艺

图 2.3-7 是冷轧 CGO 钢制造工艺流程简图。

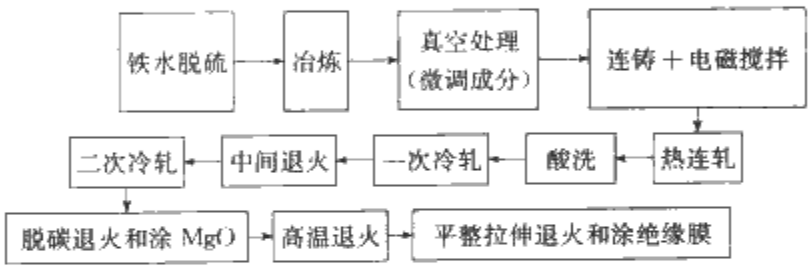


图 2.3-7 冷轧 CGO 钢制造工艺流程

3.1.3 成品要求

成品按照国标 GB/T 2521—1996 中冷轧取向硅钢规定具有如下要求。

3.1.3.1 磁特性

（1）磁感。在 800A/m 交变磁场（峰值），频率为 50Hz 时，规定的最小磁感 B_{800}（峰值）应符合表 2.3-48 规定。

（2）铁损。在磁感为 1.7T，频率为 50Hz 时，规定的最大铁损 $P_{1.7}$ 应符合表 2.3-48 的规定。

表 2.3-48 冷轧取向硅钢性能指标

牌号	公称厚度（mm）	理论密度（kg/dm³）	50Hz 最大铁损（W/kg） $P_{1.7}$	50Hz 最小磁感（T） B_{800}	最小弯曲次数	最小叠装系数（%）
27QG100	0.27	7.65	1.00	1.85	1	95
27QG110			1.10	1.85		
27Q120			1.20	1.78		
27Q130			1.30	1.78		
27Q140			1.40	1.75		
30QG110	0.30	7.65	1.10	1.85	1	95.5
30QG120			1.20	1.85		
30QG130			1.30	1.85		
30Q130			1.30	1.78		
30Q140			1.40	1.78		
30Q150			1.50	1.75		

续表

牌号	公称厚度（mm）	理论密度（kg/dm³）	50Hz 最大铁损（W/kg） $P_{1.7}$	50Hz 最小磁感（T） B_{800}	最小弯曲次数	最小叠装系数（%）
35QG125	0.35	7.65	1.25	1.85	1	96
35QG135			1.35	1.85		
35Q135			1.35	1.78		
35Q145			1.45	1.78		
35Q155			1.55	1.78		
35Q165			1.65	1.76		

注 1. 按 GB/T 3655 测试时，试样应消除应力退火，工艺为：800±20℃炉温保温 2h，然后空冷到室温。

2. 按 GB/T 13789 测试时，试样可不消除应力退火。

3.1.3.2 尺寸、外形

（1）厚度。离边部不小于 15mm 所测钢带的厚度允许偏差，横向厚度差，取向钢应符合表 2.3-49 的规定。

（2）宽度。钢带应剪边交货。剪边交货钢带的宽度允许偏差，取向钢应符合表 2.3-49 的规定。

（3）长度。长度是指由钢带剪切成的钢片长度。钢片长度一般为 2000mm，经供需双方协议，也可是宽度的倍尺。取向钢长度允许偏差应符合表 2.3-49 的规定。

表 2.3-49 取向钢带（片）的尺寸允许偏差 mm

公称宽度	公称厚度	厚度允许偏差	横向厚度差	宽度允许偏差	长度允许偏差
<150	0.27 0.30 0.35	±0.03	≤0.02	+0.2 0	+10 0
150～400				+0.3 0	
400～750			≤0.03	+0.5 0	
>750				+0.6 0	

（4）不平度（平面度）：钢片的不平度取向钢不大于 1.5%。

（5）镰刀弯钢带的镰刀弯，每 2000mm 不大于 1.0mm。

（6）毛刺：钢带（片）剪边毛刺不大于 0.05mm，对于再分条交货的钢带（片），不大于 0.10mm。

3.1.3.3 工艺特性

（1）密度、叠装系数、弯曲次数均按照表 2.3-48 的规定。

（2）绝缘涂层。各牌号钢带（片）均应涂敷绝缘涂层。绝缘涂层应能耐绝缘漆、变压器油、机器油等的侵蚀，附着性良好。取向钢的绝缘涂层应能经受住消除应力退火，消除应力退火前后所测钢板的绝缘涂层电阻最小值，尽可能符合供需双方所订协议。

3.1.4 检验

按本标准签订的供货合同。检验项目是指表 2.3-48 中所列的铁损和磁感。

磁性试样的制备应分别符合 GB/T 3655 或 GB/T 13789 的规定。

力学性能的试样当厚度小于 0.50mm 的钢带（片），测

试试样应符合 GB/T 3076 的规定；当厚度大于等于 0.50mm 的钢带（片），测试试样应符合 GB/T 6397 的规定。

叠装系数测试试样应符合 GB/T 2522 的规定。

3.2 Hi-B 钢（高磁感取向硅钢）

3.2.1 成分要求

3.2.1.1 基本成分

表 2.3-50 列示了高磁感取向硅钢冶炼化学成分。

表 2.3-50 高磁感取向硅钢冶炼化学成分 %

成分	C	Si	Mn	P	S	Als	N
范围	0.04～0.08	3.1～3.4	0.06～0.12	≤0.03	0.02～0.03	0.02～0.03	0.006～0.01

化学成分对高磁感取向硅钢的作用如下：

（1）碳的影响。Hi-B 钢碳含量为 0.04%～0.08%。Hi-B 钢中碳含量比 CGO 钢高，目的是在热轧板高温常化时保证有一定数量的 γ-相，快冷时可获得大量细小 AlN，因为氮在 γ-相中固溶度比在 α-相中大 10 倍。碳使热轧时 γ-相数量增多，在保证 γ-相数量为 20%～30%时，热轧板组织细化并为层状分布的细形变晶粒和小的再结晶晶粒，晶粒细小均匀。热轧板常化后碳以固溶碳和细小 ε-碳化物形态存在，冷轧时钉扎位错，位错密度明显增高，加工硬化更快，退火时再结晶生核位置增多，初次晶粒细小均匀，促进二次再结晶发展。

（2）硅的影响。硅含量影响 Hi-B 钢二次再结晶的发展。随硅含量增高，电阻率提高，Hi-B 钢中硅含量控制在 3.1%～3.4%，并适当提高碳含量来降低 $P_{1.7}$。但是随着硅含量增高，抑制能力减弱，原因为最终退火升温过程中 MnS 和 AlN 数量减少，而且脱碳退火后这些析出物尺寸更粗大，所以提高硅含量使二次再结晶发展速度减慢或被抑制。为此，将硅含量提高到 3.2%～3.4%时，钢中常加入少量铜、锡、锑或钼来进一步加强抑制能力。

（3）锰和硫的影响。Hi-B 钢中锰含量为 0.06%～0.12%，硫含量为 0.02%～0.03%。Hi-B 钢规定的锰和硫含量比 CGO 钢略高些，目的是适当提高加热温度和热轧时 MnS 析出温度，保证常化时析出更多细小的 AlN 来加强抑制能力。提高锰含量目的为减少 Hi-B 钢铸坯中闪电状裂纹。当硅含量提高到 3.15%～3.4%时，由于 MnS 固溶更困难，锰的上限由 0.12%降到 0.09%，硫的上限由 0.03%降到 0.027%，而且合适范围更窄。

（4）铝和氮的影响。AlN 是 Hi-B 钢的主要抑制剂，酸溶铝（Al_s）规定为 0.02%～0.03%，氮为 0.006%～0.01%。酸溶铝＝总铝量－Al_2O_3 中铝量。酸溶铝含量对磁性的影响最明显。Al_s 含量过高，玻璃膜质量变坏。N＞0.01%时浇铸易冒涨，产品出现起皮和起泡（Blister）缺陷。Al_s 和氮含量过低，常化后析出的细小 AlN 数量不足，二次再结晶不完全。

（5）磷的影响。磷有加强抑制能力，改善 MnS＋AlN 方案 Hi-B 钢磁性的作用。因为磷沿晶界偏聚，而且使析出的质点更细和分布更均匀。

3.2.1.2 抑制剂的种类及作用

Hi-B 钢与 CGO 钢的本质区别为其采用常化工艺与一次冷轧工艺。细小弥散的 AlN 质点主要是在热轧板常化过程中析出的。以 MnS＋AlN 为抑制剂的 Hi-B 钢由于锰和碳含量高于 CGO 钢，加热温度规定为 1380～1400℃。Hi-B 钢脱碳退火后合适的初次晶粒尺寸为 10～15μm。另外，生产 Hi-B 钢时以 Cu_2S＋AlN 作为抑制剂，热轧板经常化处理析出细小 AlN 质点并在脱碳退火后采用渗氮处理，进一步加强抑制能力。该项技术可将铸坯加热温度降低至 1250～1300℃。

日本新日铁八幡厂采用后期渗氮工艺，即在炼钢时只添加微量铝元素，主要用于生产 Hi-B 取向硅钢。该工艺主要特点为在脱碳退火后钢带需经 750℃×30s 的渗氮处理。高温退火升温过程中形成（Al，Si）N 质点，在二次再结晶发生前阻碍初次晶粒长大。脱碳退火后初次晶粒的合适尺寸为 18～30μm（大于高温铸坯加热工艺的初次晶粒尺寸）。该工艺可将铸坯加热温度降低至 1150～1200℃，是目前取向硅钢工业生产中铸坯加热采用的最低温度。

3.2.2 制造工艺

冷轧 Hi-B 钢制造工艺流程见图 2.3-8。

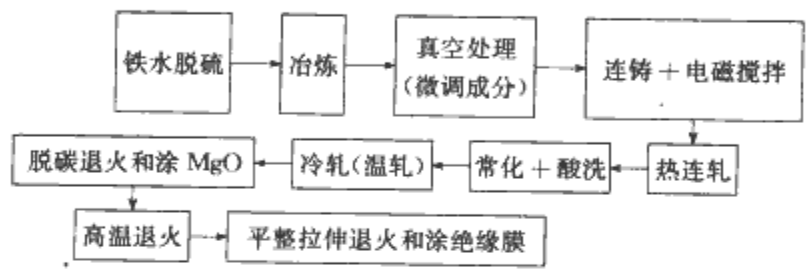


图 2.3-8 冷轧 Hi-B 钢制造工艺流程

3.2.3 成品及检验要求

成品及检验要求与 CGO 钢相同。

3.3 全工艺冷轧取向电工钢产品性能

目前冷轧取向硅钢的生产国家主要有日本、美国、俄罗斯、联邦德国等。我国冷轧取向硅钢生产厂家只有武汉钢铁公司一家。

3.3.1 国际电工委员会

根据 CEIIEC 60404-8-7—1998《全工艺冷轧取向硅钢板（带）技术标准》的规定，冷轧取向硅钢的磁性能及工艺特性见表 2.3-51 和表 2.3-52。

表 2.3-51 CEIIEC 60404-8-7—1998 规定的普通取向硅钢磁性能及工艺特性

牌号	厚度（mm）	最大铁损（W/kg）		最大铁损（W/kg）		最小磁感（T）	最小叠装系数
		$P_{1.5/50}$	$P_{1.5/60}$	$P_{1.7/50}$	$P_{1.7/60}$	B_{800}	
M120-23S6	0.23	0.77	1.01	1.20	1.57	1.78	0.945
M127-23S6	0.23	0.80	1.06	1.27	1.65	1.75	0.945
M130-27S5	0.27	0.85	1.12	1.30	1.68	1.78	0.950
M140-27S5	0.27	0.89	1.17	1.40	1.85	1.75	0.950
M140-30S5	0.30	0.92	1.21	1.40	1.83	1.78	0.955
M150-30S5	0.30	0.97	1.28	1.50	1.98	1.75	0.955
M150-35S5	0.35	1.05	1.38	1.50	1.98	1.78	0.960
M165-35S5	0.35	1.11	1.46	1.65	2.18	1.75	0.960

表 2.3-52 CEI IEC 60404-8-7—1998 规定的高磁感取向硅钢磁性能及工艺特性

牌号	厚度 (mm)	最大铁损 (W/kg)		最小磁感 (T)	最小叠装系数
		$P_{1.7/50}$	$P_{1.7/60}$	B_{800}	
M90-23P5	0.23	0.90	1.21	1.85	0.945
M95-23P5	0.23	0.95	1.25	1.85	0.945
M100-23P5	0.23	1.00	1.32	1.85	0.945
M103-27P5	0.27	1.03	1.35	1.88	0.950
M110-27P5	0.27	1.10	1.45	1.85	0.950
M105-30P5	0.30	1.05	1.38	1.88	0.955
M111-30P5	0.30	1.11	1.46	1.88	0.955
M117-30P5	0.30	1.17	1.54	1.85	0.955
M125-35P5	0.35	1.25	1.64	1.88	0.960
M135-35P5	0.35	1.35	1.77	1.88	0.960

3.3.2 日本

根据 JISC 2553—2000《取向硅钢片及钢带》的规定，取向硅钢的磁性能及工艺特性见表 2.3-53。

表 2.3-53 JISC 2553—2000 规定的取向硅钢磁性能及工艺特性

牌号	厚度 (mm)	密度 (kg/dm^3)	最大铁损 $P_{1.7/50}$ (W/kg)	最小磁感 B_{800} (T)	最小叠装系数 (%)
23R085	0.23	7.65	0.85	1.85	94.5
23R090			0.90	1.85	
23P090			0.90	1.85	
23P095			0.95	1.85	
23P100			1.00	1.85	
23G110			1.10	1.78	95.0
27R090	0.27		0.90	1.85	
27R095			0.95	1.85	
27P100			1.00	1.88	
27P110			1.10	1.85	
27G120			1.20	1.78	
27G130			1.30	1.78	95.5
30P105			1.05	1.88	
30P110	0.30		1.10	1.88	
30P120			1.20	1.85	
30G130			1.30	1.78	
30G140			1.40	1.78	96.0
35P115			1.15	1.88	
35P125			1.25	1.88	
35P135			1.35	1.88	
35G145	0.35		1.45	1.78	
35G155			1.55	1.78	

3.3.3 欧洲

根据 BSEN 10107—2005《全工艺取向硅钢片（带）》的规定，取向硅钢的磁性能及工艺特性见表 2.3-54 和表 2.3-55。

表 2.3-54 BSEN 10107—2005 规定的普通取向硅钢磁性能及工艺特性

牌号	钢号	厚度 (mm)	最小磁感 (T)	最大铁损 (W/kg)		最小叠装系数
			B_{800}	$P_{1.5/50}$	$P_{1.7/50}$	
M110-23S	1.086 3	0.23	1.78	0.73	1.10	0.945
M120-23S	1.086 4	0.23	1.78	0.77	1.20	0.945
M127-23S	1.086 0	0.23	1.75	0.80	1.27	0.945
M120-27S	1.086 8	0.27	1.78	0.80	1.20	0.950
M130-27S	1.086 6	0.27	1.78	0.85	1.30	0.950
M140-27S	1.086 5	0.27	1.75	0.89	1.40	0.950
M130-30S	1.085 9	0.30	1.78	0.85	1.30	0.955
M140-30S	1.086 2	0.30	1.78	0.92	1.40	0.955
M150-30S	1.086 1	0.30	1.75	0.97	1.50	0.955
M140-35S	1.085 8	0.35	1.78	1.00	1.40	0.960
M150-35S	1.085 7	0.35	1.78	1.05	1.50	0.960
M165-35S	1.085 6	0.35	1.75	1.11	1.65	0.960

表 2.3-55 BSEN 10107—2005 规定的高磁感取向硅钢磁性能及工艺特性

牌号	钢号	厚度 (mm)	最小磁感 (T)	最大铁损 (W/kg)	最小叠装系数
			B_{800}	$P_{1.7/50}$	
M85-23P[b]	1.082 2	0.23	1.88	0.85	0.945
M90-23P[b]	1.083 5	0.23	1.88	0.90	0.945
M95-23P	1.083 6	0.23	1.88	0.95	0.945
M100-23P	1.087 9	0.23	1.85	1.00	0.945
M90-27P[b]	1.083 8	0.27	1.88	0.90	0.950
M95-27P[b]	1.083 9	0.27	1.88	0.95	0.950
M103-27P	1.088 0	0.27	1.88	1.03	0.950
M100-30P[b]	1.085 2	0.30	1.88	1.00	0.955
M105-30P	1.088 6	0.30	1.88	1.05	0.955
M111-30P	1.088 1	0.30	1.88	1.11	0.955
M125-35P	1.085 4	0.35	1.88	1.25	0.960

3.3.4 美国

根据 ASTMA 876—2003《全工艺冷轧取向硅钢技术标准》的规定，冷轧取向硅钢的磁性能见表 2.3-56。

表 2.3-56 ASTMA 876—2003 规定的普通晶粒取向硅钢在 1.5T 下的铁损值

ASTM 牌号	厚度 (mm)	最大铁损 (W/kg)	
		$P_{1.5/60}$	$P_{1.5/50}$
18G041	0.18	0.90	0.68
23G045	0.23	0.99	0.75
27G051	0.27	1.12	0.85
30G058	0.30	1.28	0.97
35G066	0.35	1.46	1.11

续表

普通晶粒取向硅钢在1.7T下的铁损值			
ASTM牌号	厚度（mm）	最大铁损（W/kg）	
		$P_{1.7/60}$	$P_{1.7/50}$
23H070	0.23	1.54	1.17
27H074	0.27	1.63	1.24
30H083	0.30	1.83	1.39
35H094	0.35	2.07	1.57

高磁感晶粒取向硅钢在1.7T下的铁损值			
ASTM牌号	厚度（mm）	最大铁损（W/kg）	
		$P_{1.7/60}$	$P_{1.7/50}$
23P060	0.23	1.32	1.01
27P066	0.27	1.46	1.11

激光刻痕高磁感晶粒取向硅钢在1.7T下的铁损值			
ASTM牌号	厚度（mm）	最大铁损（W/kg）	
		$P_{1.7/60}$	$P_{1.7/50}$
23Q054	0.23	1.19	0.90
27Q057	0.27	1.28	0.97

注 对于普通取向硅钢磁场强度在796A/m下峰值磁导率μ_p通常超过1800，对于高磁感取向硅钢μ_p通常超过1880。

3.3.5 俄罗斯

根据ГОСТ 21427.4—1991《冷轧取向硅钢技术条件》的规定，冷轧取向硅钢的磁性能见表2.3-57。

表2.3-57 ГОСТ 21427.4—1991规定的取向硅钢磁性能

厚度（mm）	牌号	铁损（W/kg）		磁感应强度（T）	
		$P_{1.5/50}$	$P_{1.7/50}$	B_{1000}	B_{2500}
0.50	3412	2.10			1.80
	3413	1.75			1.85
	3414	1.50			1.88
0.35	3412	1.50			1.80
	3413	1.30	(1.90)	(1.58)	1.85
	3404		1.60	1.60	
	3405		1.50	1.61	
	3406		1.43	1.62	
	3407		1.36	1.72	
	3408		1.30	1.74	
0.30	3413	1.19	(1.75)	(1.58)	1.85
	3404		1.50	1.60	
	3405		1.40	1.61	
	3406		1.33	1.62	
	3407		1.26	1.72	
	3408		1.20	1.74	
0.27	3405		1.38	1.61	
	3406		1.27	1.62	
	3407		1.20	1.72	
	3408		1.14	1.74	

注 （ ）内数值为非主要标准特性。

3.3.6 日本新日铁

根据新日铁关于取向硅钢的规定，其取向硅钢典型磁性能见表2.3-58。

表2.3-58 新日铁取向硅钢板典型数据

厚度（mm）	等级	铁损（W/kg）		磁感应强度（T）
		$P_{1.5/50}$	$P_{1.7/50}$	B_{800}
0.23	23ZDKH90	0.60	0.83	1.91
	23ZH90	0.63	0.87	1.92
	23ZH95	0.64	0.90	1.91
	23ZH100 M0H	0.66	0.93	1.90
	23ZH100 M1	0.69	1.02	1.86
	23Z110	0.70	1.06	1.85
	23Z110 M2	0.71	1.08	1.85
	23Z110 M3	0.76	1.12	1.84
0.27	27ZDKH95	0.66	0.89	1.92
	27ZH95	0.69	0.93	1.92
	27ZH100	0.70	0.96	1.91
	27ZH100 M0H	0.72	0.99	1.91
	27ZH100 M1H	0.74	1.03	1.90
	27ZH110	0.74	1.03	1.90
	27Z120	0.79	1.15	1.85
	27Z120 M3	0.80	1.17	1.85
	27Z120 M4	0.83	1.22	1.84
	27Z130	0.83	1.23	1.84
0.30	30ZH100	0.73	0.98	1.92
	30ZH105 M0H	0.74	1.01	1.91
	30ZH110	0.76	1.05	1.90
	30ZH110 M1H	0.77	1.06	1.90
	30ZH110 M2H	0.81	1.12	1.90
	30ZH120	0.81	1.12	1.90
	30Z120	0.82	1.17	1.85
	30Z120 M3	0.83	1.19	1.85
	30Z130	0.86	1.25	1.84
	30Z130 M4	0.86	1.24	1.84
	30Z130 M5	0.90	1.29	1.83
	30Z140	0.90	1.33	1.83
0.35	35ZH115	0.86	1.14	1.93
	35ZH115 M1H	0.87	1.15	1.93
	35ZH115 M2H	0.90	1.19	1.92
	35ZH125	0.91	1.21	1.92
	35ZH125 M3H	0.93	1.24	1.92
	35ZH135	0.95	1.27	1.91
	35Z135	0.94	1.33	1.84
	35Z135 M5	0.96	1.35	1.84
	35Z145	0.98	1.39	1.84
	35Z155	1.01	1.46	1.83
	35Z155 M6	1.01	1.46	1.83

3.4 冷轧取向硅钢薄带

1949年利特曼（M.F. Littmann）根据邓恩（C.G. Dunn）

等提出的3%Si的（110）[001]单晶体经50%～70%冷轧转变为{111}〈112〉冷轧织构，经初次再结晶退火又转变为（110）[001]再结晶织构的规律（这两种位向的关系是晶体绕〈001〉轴转动约35°的规律），用厚度为0.23～0.35mm多晶体取向硅钢产品再经冷轧和退火制成取向硅钢薄带，满足了雷达中脉冲变压器等所需要的材料。

3.4.1 制造工艺

冷轧取向硅钢薄带制造工艺流程如图2.3-9所示。

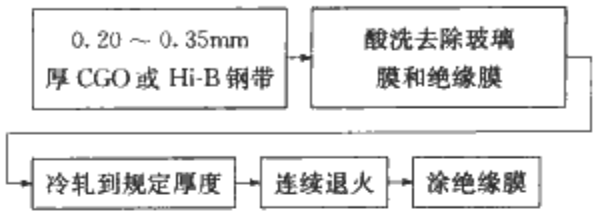


图2.3-9 冷轧取向硅钢薄带制造工艺流程

3.4.2 成品要求

取向硅钢薄带适用于制造工作频率在400Hz以上的各种电源变压器、脉冲变压器、磁放大器、变换器等铁心。成品应符合GB 11255—1989的规定。

3.4.2.1 产品分类

（1）符号和代号。DG1～DG6表示晶粒取向硅钢薄带的牌号。

D—“电”字汉语拼音的第一个字母，表示电讯工业用钢。

G—“高”字汉语拼音的第一个字母，表示工作频率在400Hz以上。

1～6—钢带电磁性能级别，从1～6表示钢带的电磁性能从低到高。

（2）牌号。本标准包括DG3、DG4、DG5、DG6等六个牌号。

（3）尺寸。钢带的尺寸应符合表2.3-59的规定。钢带的厚度和宽度允许偏差应符合表2.3-60的规定。

表2.3-59 冷轧取向硅钢薄带尺寸 mm

厚 度	宽 度	长 度
≤0.03	5、6.5、8、10、12.5、15、16、20、25、32、40、50、64、80、100	≥20 000
0.05		
0.08		
0.10		
0.15		≥15 000
0.20	<1000	

表2.3-60 冷轧取向硅钢薄带厚度和宽度允许偏差 mm

厚度	厚度允许偏差	宽度允许偏差				
		5～10	>10～15	>50～80	>80	>600
≤0.03	±0.005	±0.10	+0.10 −0.15	+0.10 −0.20	±0.20	
0.05						
0.08	±0.010					
0.10						
0.15	±0.015					
0.20	±0.015	—	—	+0.10 −0.30	—	+1.0 0

3.4.2.2 技术要求

（1）电磁性能。钢带试样消除应力退火后铁损$P_{1.5/400}$、$P_{0.5/3000}$和磁感应强度B_{50}、B_{1000}应符合表2.3-61规定。

表2.3-61 冷轧取向硅钢薄带的电磁性能

牌号	厚度	铁损（W/kg）				磁感应强度（T）		矫顽力（A/m）
		$P_{1.0/400}$	$P_{1.5/400}$	$P_{1.0/1000}$	$P_{0.5/3000}$	B_{50}	B_{1000}	H_c
		不大于				不小于		不大于
DG3	0.025	—	—	—	35	—	1.60	60
DG3	0.03	—	—	—	35	—	1.65	45
DG4	0.03				30		1.70	40
DG3	0.05	—	17.0	24.0	—	0.85	1.66	32
DG4			16.0	22.0		0.90	1.70	32
DG5			15.0	20.0		1.05	1.75	32
DG6			14.5	19.0		1.10	1.75	32
DG3	0.08、0.10	—	17.0	—	—	0.90	1.66	28
DG4			16.0			1.00	1.70	26
DG5			15.0			1.05	1.75	26
DG6			14.5			1.20	1.80	26
DG3	0.15	—	19.0	—	—	0.90	1.65	26
DG4			18.0			1.00	1.75	26
DG5			17.0			1.10	1.75	26
DG6			16.5			1.13	1.75	26
DG3	0.20	10.0	—	—	—	—	1.66	—
DG4		9.0					1.70	
DG5		8.2					1.74	

注 1. 铁损$P_{1.0/400}$、$P_{1.5/400}$、$P_{1.0/1000}$、$P_{0.5/3000}$分别表示在频率为400Hz、磁感应强度值1.0T时，400Hz、1.5T时，1000Hz、1.0T时和3000Hz、0.5T时的比铁损值。

2. 磁感应强度B_{50}、B_{1000}分别表示磁场为50A/m和1000A/m时的磁感应强度值。

3. 0.20mm厚度的DG3～DG5试样要求沿轧向剪切，尺寸为30mm×300mm，消除应力退火后测试。

4. 铁损$P_{1.0/1000}$和矫顽力H_c供参考，不作判定依据。

（2）交货状态。钢带应以退火状态并在钢带表面涂上绝缘涂层后交货。当用户需要时也可以冷轧状态交货，但质保书上应给出退火状态的磁性能数据。

（3）绝缘涂层。钢带绝缘涂层应干燥、均匀、不脱落。钢带绝缘涂层应具有良好的绝缘性、附着性、防锈性和耐热性，能经受消除应力退火。

（4）表面质量。钢带边部的毛刺应不大于厚度的允许偏差。钢带表面应光滑，不允许有累计超过钢带长度1%的锈蚀、裂纹、凸包、折叠、孔洞等影响使用的缺陷。当单个缺陷长度小于钢带宽度时，应以带宽计算其长度。钢带应平整，不允许有严重的浪皱和瓢曲。0.20mm厚度的DG1～DG5的表面质量应符合GB 2521的规定。

3.4.2.3 检验

（1）每批料取两个试样，分别剪切成10mm宽度，绕成内径为33mm，外径为40mm环形试样，测量磁性能。允许采用其他尺寸的环形试样测试，但其平均直径与径宽比应不小于10。

（2）磁性能测量试样必须先经过消除应力退火，退火工艺由生产厂推荐。

（3）电磁性能试验方法：钢带磁感应强度值和矫顽力测量方法按GB3657规定。钢带铁损测量方法按GB 10129的规定。

4 软磁合金

软磁合金是指除电工纯铁、低碳电工钢和硅钢以外的软磁合金，包括铁镍系、铁钴系、铁铝系及不锈（耐蚀）软磁合金等。它是一种传统的结晶态材料。

软磁合金按磁特性或磁滞回线形状可分为高磁导率的正常磁滞回线（R 形磁滞回线）合金、高矩形比（B_r/B_s）的矩形磁滞回线（Z 形磁滞回线）合金和低剩磁（B_r）的扁平磁滞回线（F 形磁滞回线）合金等三类。这三种磁滞回线见图 2.3-10。

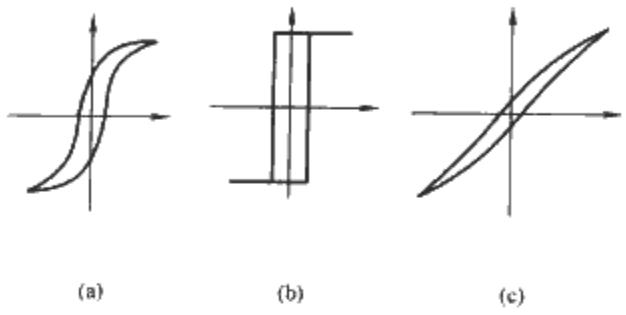


图 2.3-10 软磁合金的三种磁滞回线
(a) R 形；(b) Z 形；(c) F 形

软磁合金的最大特征是磁导率（μ）高，矫顽力（H_c）小（≤800A/m），磁滞回线面积窄。软磁合金用途广泛，可分为电力工业用的电机、变压器铁心材料，电子工业用的音频、高频变压器、脉冲变压器、磁放大器、互感器、磁头、磁屏蔽材料等。

从物理角度看，软磁材料有二种用途：一是能量的产生、变化、传输、利用等。用于制造变压器铁心、发电机、电动机的定转子等，工业上称为功率器件；二是信息的转换、放大、传送和存储等。用于制造磁放大器，传感器，磁记录磁头铁心等，也叫导磁器件。被利用的性能有两类：一是结构敏感的性能，如 μ、H_c、损耗（P）、矩形比（B_r/B_m）、电阻率（ρ）等。这些性能不仅与材料的化学组成有关，也与材料的制造工艺、内部的组织结构有关。这些性能都是技术上直接使用的性能，故也叫技术参数；另一类是结构不敏感的性能，如磁晶各向异性常数（K_1），饱和磁致伸缩系数（λ_s）、饱和磁感应强度（B_s），居里温度（T_c）等，它们基本上由组成材料的化学成分决定，又叫基本参数。软磁材料的制造过程，从原料的选取到最终热处理，都有严格的规定，以保证获得所需要的成分，组织结构及性能。

4.1 铁镍系软磁合金

铁镍系软磁合金一般通称为坡莫合金，是英文 Permalloy 字头的译音，意为导磁合金。最早是由美国 Bell Telephone Lab 命名的。现已成为磁学的专用名词，专指含 Ni34%～84%的二元或多元镍铁基软磁合金。

在软磁材料的发展史上，铁镍合金的发现和发展是一个重要的突破，可以说它是软磁材料中最具有代表性的“多才多艺”的合金。这是因为：

（1）综合磁性能优异。早先的铁镍合金以在弱磁场中具有高磁导率，低矫顽力而著称。与其他合金相比，这个特点至今仍然保持着。例如，0.1mm 厚的薄带，在 0.08A/m 的弱磁场中的起始磁导率（μ_i）可达 200 000 以上，最大磁导率（μ_m）可达 1300 000 以上，矫顽力（H_c）在 0.16A/m 以下。

（2）近年来，利用调整成分及采用适当的工艺，已能在很宽的范围内控制合金的磁性能，如磁导率和矫顽力可以有 10^3～10^4 倍的变化。除在弱磁场下应用的高 μ_i 合金外，还出现了高频低损耗，高硬度高磁导率，低剩磁（B_r）大磁感应增量（$\Delta B_m = B_m - B_r$），恒磁导率等类型的合金，以适应不同的需要。

（3）具有良好的冷加工塑性，可轧成厚度仅为 0.5μm 的超薄带，以满足高频技术和计算技术发展的需要。

（4）铁镍合金的使用十分广泛，特别是作为导磁元器件，已成为通信、广播、雷达、宇航、计算技术和精密仪器仪表等工业不可缺少的基础材料。

除上述特点外，铁镍合金的主要不足之处有：

（1）含镍等昂贵元素较多，成本高。

（2）合金的磁性能对工艺因素的变动十分敏感。为获得较好的磁性能，一般要求采用真空冶炼、多辊轧机冷轧、高纯度氢气或高真空退火，有时还要进行纵向或横向热处理等。不仅生产设备复杂，而且工艺要求严格，否则难以保证产品性能及其一致性。

（3）合金的饱和磁感应强度 B_s 值较低，不宜做电力和配电变压器等在高磁感应强度下工作的器件的铁心材料。

由于铁镍合金的以上弱点，几十年来各国都在研究不含镍的替代材料。但由于铁镍合金的多种优异性能，至今仍然是最重要的软磁材料之一。

铁镍合金可以按成分、性能或用途来分类，图 2.3-11 示出了镍含量对磁性能的影响。图中的黑影区示出了常用的两类成分区：含 Ni45%～68%的中镍合金和含 Ni72%～84%的高镍合金。每一个成分区均可获得不同磁滞回线的合金。

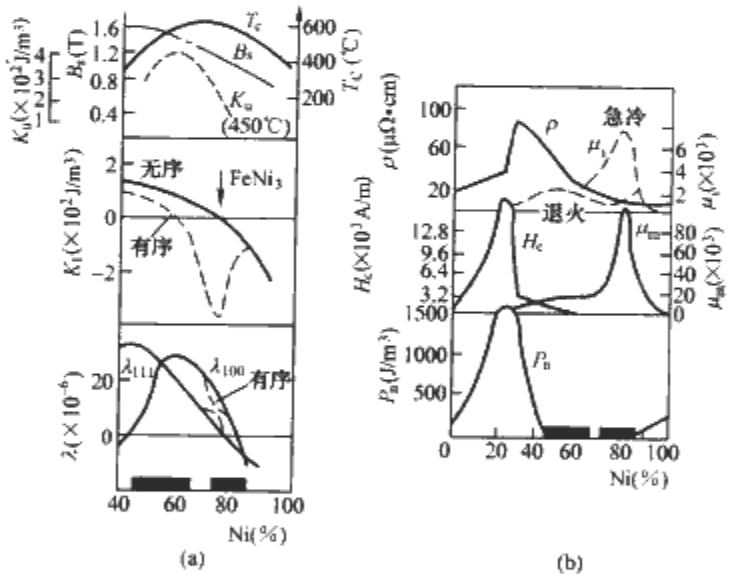


图 2.3-11 铁镍合金的成分对性能的影响
(a) 镍含量对性能 T_c、K_u、B_s、K_1、λ 的影响；
(b) 镍含量对性能 ρ、μ_i、μ_m、H_c、P_n 的影响

铁和镍都是内电子层未填满的过渡金属，图 2.3-12 为铁镍二元合金相图，该图是平衡相图，仅在十分缓慢冷却的条件下才能获得。由图可知镍在固态只有一种形态，即面心立方 γ-相。铁在 912℃处有同素异晶转变，912℃以上是面心立方 γ-相，912℃以下是体心立方 α-相。镍加入铁后扩大了铁的 γ-相区，图 2.3-13 示出含镍在 35%以下的合金的实用状态图，它是在通常工业中实现的冷却和加热速度的条件下测定的（冷却速度不低于每天 10℃），因此是一个实用的状态图。由图可知，在一般实用的冷却条件下，含镍 30%以上的合金在室温时都为单相的面心立方（γ）结构，镍低于 30%时，有 $\alpha \Longleftrightarrow \gamma$ 相变。（α+γ）两相区的界限，由于热滞现象在加热和冷却时有差异。

相图中在 Ni_3Fe，FeNi，Fe_3Ni 的成分处会发生有序无序转变。其中对磁性影响最大的是在 Ni79.5%（质量分数）

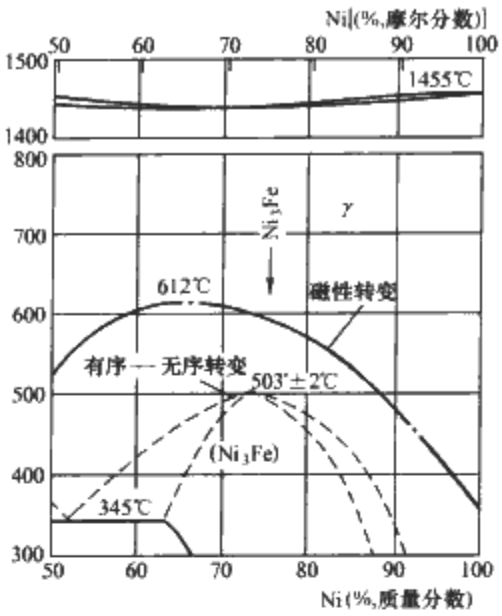


图 2.3-12 Fe—Ni 合金的平衡相图

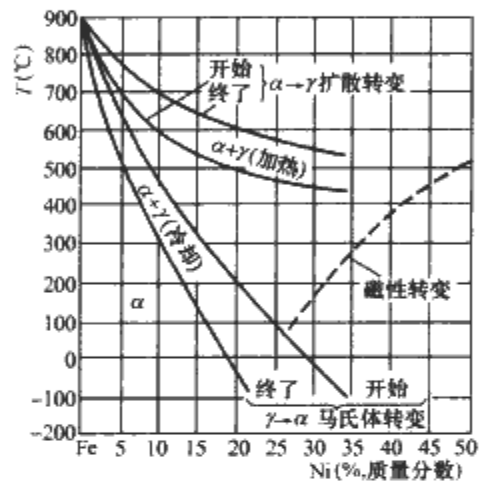


图 2.3-13 在低 Ni 区 Fe—Ni 合金的适用状态图

[75%（摩尔分数）] 附近的 Ni_3Fe 有序转变，其有序转变温度为 503℃±2℃，在 Ni_3Fe 标准成分的上下 10%Ni 的范围内可能都存在这个转变。在发生有序转变时，合金的点阵常数和物理性能都会发生变化。

FeNi 系合金的成分对某些电磁性能的影响已示于图 2.3-11，图 2.3-14 为镍含量对 Fe—Ni 合金密度（d），电阻率（ρ）和膨胀系数（α）的影响，分别简述如下：

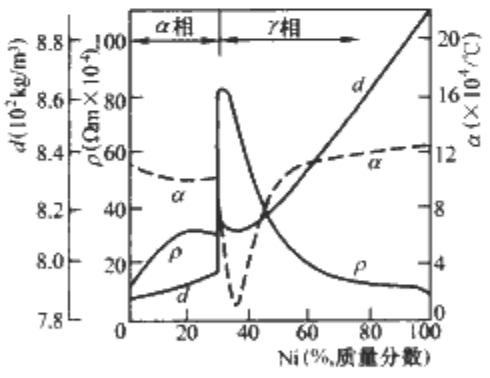


图 2.3-14 Fe—Ni 合金的密度（d）电阻率（ρ）和热膨胀系数（α）随含 Ni 量的变化

镍的饱和磁感应强度（B_s）约为 057T，铁的 B_s 约为 2.158T，镍加到铁中 B_s 值要下降，但在 48%（质量分数）Ni 处，B_s 最大（达 1.6T），在 Ni_3Fe 有序成分区，有序转变可使 B_s 有不超过 6%的变化。

镍的居里温度（T_c）为 358℃，铁的 T_c=770℃，铁中加入镍使 T_c 下降，但在 65%～68%（质量分数）Ni 处，T_c 达最高（～612℃）。T_c 不因合金冷却速率不同而有明显变化。

面心立方晶格纯镍的易磁化方向是〈111〉，难磁化方向是〈100〉，其磁晶各向异性常数（K_1）约等于 $-0.548\times10^4 J/m^3$。体心立方纯铁的易磁化方向是〈100〉，难磁化方向是〈111〉，其 K_1 约等于 $+4.81\times10^4 J/m^3$。镍加入铁中使 K_1 从正值向负值方向变化，同时易磁化方向也从〈100〉晶向（$K_1>0$）转向〈111〉晶向（$K_1<0$）。

多晶镍的饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s=-33\times10^{-6}$，〈100〉方向的磁致伸缩系数 $\lambda_{100}=-45.9\times10^{-6}$，〈111〉方向的 λ_{111} 为 -24.3×10^{-6}。多晶铁的 $\lambda_s=-4.4\times10^{-6}$，$\lambda_{100}=20.7\times10^{-6}$，$\lambda_{111}=-21.2\times10^{-6}$。$\lambda_{100}$ 在 45%和 81%（质量分数）Ni 处通过零值，λ_{111} 在 80%（质量分数）Ni 处通过零值。

Ni_3Fe 有序无序转变对 K_1 和 λ 都有影响，但对 K_1 的影响更大。在快冷无序状态，76%（质量分数）Ni 处 $K_1\approx0$，在慢冷有序状态，64%（质量分数）Ni 处的 $K_1\approx0$。

铁镍合金的起始和最大磁导率（μ_i 和 μ_m），矫顽力（H_c），磁滞损耗（P_h）都是结构敏感的性质，除了与成分有关外还与结构状态有关。对比图 2.3-11 中各性能可知，一般在 K_1 和 λ 值较小的成分区，μ 值较高，H_c 和 P_h 较小，如在 45%～50%（质量分数）Ni 和 80%（质量分数）Ni 处出现两个 μ_i 峰。前者 $K_1>0$，易磁化方向上的 $\lambda_{100}\to0$，后者与 $K_1\to0$ 的同时 $\lambda_{111}\to0$ 有关。由于 45%～50%（质量分数）Ni 处的 K_1 值比 80%（质量分数）Ni 处大，故 μ_i 值较后者低。

在室温附近合金系的电阻率（ρ），密度（d）和热膨胀系数（α）随镍含量的变化示于图 2.3-14，可见合金在 30%（质量分数）Ni 附近发生 $\alpha\Leftrightarrow\gamma$ 转变，使物性发生突变。纯 Fe 的 $\rho=0.1\mu\Omega\cdot m$，纯镍的 $\rho=0.065\mu\Omega\cdot m$，二者组成合金后使 ρ 增加，大约在 30%（质量分数）Ni 处 ρ 达到最大值。含 Ni 大于 30%（质量分数）时，在室温下皆为 γ 相区，ρ 随 Ni 含量的增加明显单调下降，80%（质量分数）Ni 合金的 ρ 值只相当于 50%（质量分数）Ni 合金 ρ 值的一半。Ni_3Fe 有序无序转变，可以使 ρ 值发生 12%左右的变化。膨胀系数 α 在 36%（质量分数）Ni 附近出现最低值，这是由于所谓“因瓦”效应引起的。典型铁镍合金的机械性能如表 2.3-62 所示。

表 2.3-62 典型铁镍合金机械性能

合金成分和牌号（质量分数）	状态	屈服强度（MPa）	抗拉强度（MPa）	硬度		伸长率 δ（%）	扬氏模量（GPa）
				HB	HV		
Ni36Fe（1J36）	冷轧		990		290		130
	退火		540		115		130
Ni50Fe（1J50）	冷轧	685	785	170		5	170
	退火	150	450	130		37	170
Ni79Mo4（1J79）	冷轧	980	1030	210		4	210
	退火	170	560	120		38	210
Ni77Mo4Cu5（1J77）	冷轧		980		290	3	185
	退火		540		110	40	185

4.1.1 高初始磁导率合金及应用

这类合金的特点是在弱磁场中具有高的初始磁导率，表 2.3-63 列出了国家标准 GB$_n$198—1988 中列出的牌号和直流性能。这类合金的磁滞回线形状见图 2.3-10（a）。表 2.3-64 列出了最常用的两种合金的交流磁性能。

表 2.3-63 高初始磁导率铁镍合金的直流磁性能（GB_n 198—1988）

合金牌号（主成分）	产品种类	级别	厚度或直径（mm）	初始磁导率 μ_i 不小于	最大磁导率 μ_m 不小于	矫顽力 H_c 不大于（A/m）	饱和磁感应强度 B_s（T）
1J76（Ni76-Cu5Cr2）	冷轧带材		0.02～0.04	15 000	60 000	4.8	0.75
			0.05～0.09	18 000	100 000	3.2	
			0.10～0.19	20 000	140 000	2.8	
			0.20～0.50	25 000	180 000	1.4	
1J77-（Ni77-Mo4Cu5）			0.05～0.09	30 000	140 000	2.0	0.60
			0.10～0.19	40 000	180 000	1.2	
			0.20～0.34	50 000	220 000	1.0	
			0.35～0.50	60 000	250 000	0.8	
1J79（Ni79Mo4）		Ⅰ	0.005	10 000	35 200	6.4	0.75
			0.01	14 000	70 000	4.8	
			0.02～0.04	16 000	90 000	4.0	
			0.05～0.09	18 000	110 000	2.8	
			0.10～0.19	20 000	130 000	2.0	
			0.20～0.34	22 400	180 000	1.6	
			0.35～1.00	24 800	200 000	1.2	
			1.10～2.50	22 400	180 000	1.6	
			2.51～3.00	21 000	150 000	2.0	
		Ⅱ	0.005	12 000	60 000	4.8	
			0.01	16 000	88 000	3.2	
			0.02～0.04	20 000	100 000	2.4	
			0.05～0.09	20 000	120 000	1.6	
			0.10～0.19	22 400	152 000	1.2	
			0.20～0.34	24 800	200 000	1.2	
			0.35～1.00	30 000	224 000	1.0	
			1.10～2.50	24 800	184 000	1.2	
		Ⅲ	0.01	20 000	120 000	2.4	0.73
			0.02～0.04	24 800	152 000	1.6	
			0.05～0.09	30 000	200 000	1.2	
			0.10～0.19	30 000	200 000	1.2	
			0.20～0.34	30 000	224 000	1.0	
			0.35	35 200	248 000	1.0	
	热轧（锻）扁材		3～22	20 000	100 000	2.4	0.75
	热轧（锻）棒材		8～100	20 000	100 000	2.4	
1J80（Ni80-Cr3Si1）	冷轧带材	Ⅰ	0.005	8000	30 000	8.0	0.65
			0.01	14 000	60 000	4.8	
			0.02～0.04	18 400	75 000	4.0	
			0.05～0.09	20 000	90 000	3.2	
			0.10～0.19	22 400	120 000	2.4	
			0.20～0.34	28 000	140 000	1.6	
			0.35～0.50	35 200	160 000	1.2	
			0.51～1.00	35 000	160 000	1.0	
			1.10～2.50	24 800	152 000	1.2	

续表

合金牌号（主成分）	产品种类	级别	厚度或直径（mm）	初始磁导率 μ_i 不小于	最大磁导率 μ_m 不小于	矫顽力 H_c 不大于（A/m）	饱和磁感应强度 B_s（T）
1J80	冷轧带材	Ⅱ	0.02～0.04	22 400	100 000	3.2	0.65
			0.05～0.09	30 000	152 000	1.6	
			0.10～0.19	32 000	160 000	1.2	
			0.20～0.34	35 200	160 000	1.2	
			0.35～0.50	35 200	200 000	1.0	
		Ⅲ	0.01	24 800	88 000	3.2	
			0.02～0.04	30 000	120 000	1.6	
			0.05～0.09	40 000	200 000	1.0	
			0.10～0.34	44 800	200 000	1.0	
			0.35～0.50	50 400	248 000	0.8	
	热轧（锻）扁材		3～22	22 000	80 000	2.4	0.65
	热轧（锻）棒材		8～100	22 000	80 000	2.4	
1J85（Ni80-Mo5）	冷轧带材	Ⅰ	0.005～0.01	16 000	70 000	4.8	0.70
			0.02～0.04	18 000	80 000	3.6	
			0.05～0.09	28 000	110 000	2.4	
			0.10～0.19	30 000	150 000	1.6	
			0.20～0.34	40 000	180 000	1.2	
			0.35～1.00	50 000	250 000	0.8	
			1.10～2.50	40 000	150 000	1.2	
			2.51～3.00	35 000	120 000	1.4	
		Ⅱ	0.02～0.04	30 000	110 000	2.4	
			0.05～0.09	40 000	140 000	1.6	
			0.10～0.19	50 000	180 000	1.2	
			0.20～0.34	60 000	200 000	1.0	
			0.35	55 000	260 000	0.7	
	热轧（锻）扁材		3～22	30 000	100 000	1.6	
	热轧（锻）棒材		8～100	30 000	100 000	1.6	
1J86（Ni81Mo6）	冷轧带材		0.005～0.01	10 000	80 000	4.0	0.60
			0.02～0.04	30 000	110 000	2.4	
			0.05～0.09	40 000	150 000	1.4	
			0.10～0.19	50 000	180 000	1.2	
			0.20～0.34	60 000	220 000	0.7	
			0.35～1.00	50 000	200 000	1.2	

注 1. 初始磁导率 μ_i 在 0.08A/m、饱和磁感应强度 B_s 在 800A/m 的磁场强度下测量；

2. 按供需方协议，Ⅱ级和Ⅲ级 1J79、1J80、1J85 合金的 μ_i 和 μ_m 中的一个指标符合标准时允许交货，但其他参数不能比Ⅰ级差。

表 2.3-64 高初始磁导率铁镍合金的交流磁性能（GB_n198—1988）

合金牌号	产品种类	级别	厚度(mm)	当峰值磁场强度为0.1A/m，不同频率下的磁导率 μ_p			
				60Hz	400Hz	1kHz	10kHz
				不小于			
1J79	冷轧带材	Ⅱ	0.02	—	—	14 000	10 000
			0.05	—	—	15 000	7500
			0.10	—	18 000	12 000	—
			0.20	—	10 000	6000	—
			0.35	20 000	7000	—	—
1J85	冷轧带材	Ⅱ	0.02	—	—	16 000	12 000
			0.05	—	—	25 000	9000
			0.10	—	25 000	20 000	—
			0.20	—	19 000	8000	—
			0.35	30 000	10 000	—	—

符合Ⅱ级磁性能的1J79、1J85合金，其交流典型磁性能曲线见图2.3-15～图2.3-18。图中 μ_p 是在峰值磁场强度为0.1A/m时的峰值磁导率；$P_{0.5}$ 是在磁感应强度分别为0.5T时的比铁损；B、H 分别是在交流磁场磁化时的磁感应强度和磁场强度的峰值。

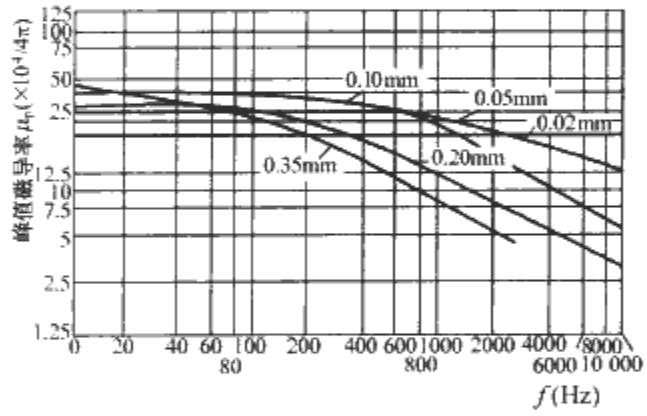


图2.3-15 1J79合金的峰值磁导率与频率的关系曲线

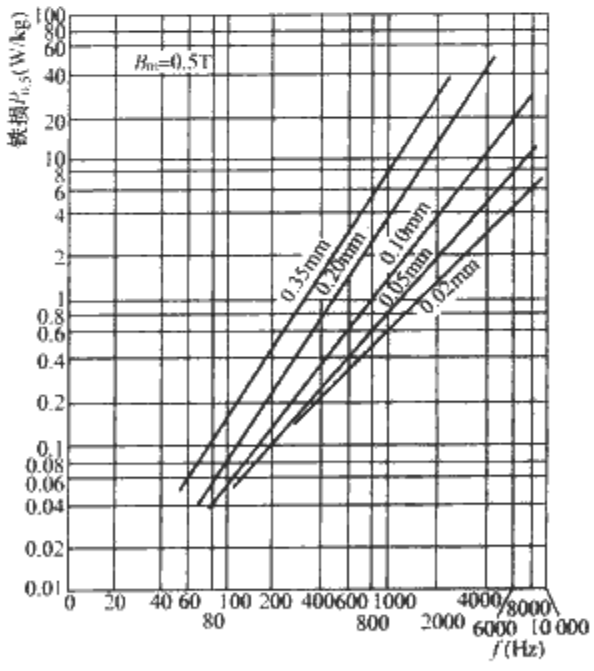


图2.3-16 1J79合金的铁损与频率的典型曲线

表2.3-65列出了国内外超高磁导率铁镍合金的商品牌号及其性能水平的对比。表2.3-66列出超高磁导率铁镍系

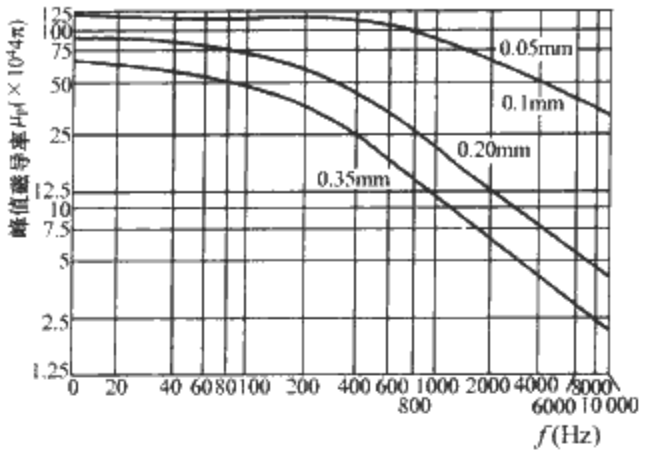


图2.3-17 1J85合金的峰值磁导率与频率的关系曲线

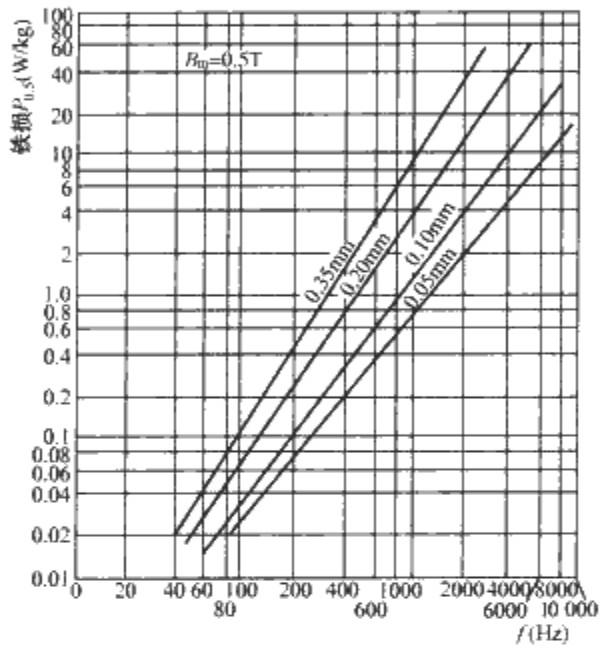


图2.3-18 1J85合金的铁损与频率的典型曲线

合金的化学成分及其磁性能的研究水平。

高磁导率铁镍合金在工业中有着广泛的用途，如用作高灵敏导磁元件、探头、各类电子变压器、磁屏蔽、磁放大器、互感器、磁调制器、变换器、继电器、微电机及录音录像磁头等铁芯材料。

表2.3-65 国内外超高磁导率铁镍合金的商品牌号及性能水平

公司	牌号	μ_i	μ_m	H_c(A/m)	B_s(T)
德国 VAC	Ultreperm250	300 000		0.24	0.74
	Ultreperm20	250 000	400 000	0.3	0.74
德国 Krupp	Magnifer7904	>240 000	500 000	<1.0	0.78
	Hyperm max200	200 000	320 000	0.4	0.80
	Hyperm max300	300 000	400 000	0.4	0.80
德国 Auerhammer	Super Muniperm280	300 000	450 000	0.5	0.80
日本 YAMAHA	YMPC	100 000～300 000	200 000～500 000	0.4～0.8	0.70～0.75
日本 住友特金	PC-2	200 000	350 000	0.64	0.73
法国 Imphy	Permimphy6	250 000	400 000	0.24	0.80
	Superimphy	300 000	400 000	0.24	0.80
首钢冶金研究院	1J77A	250 000	450 000	0.3	0.70
		200 000	300 000	0.5	

注 μ_i为在0.4A/m磁场下测得的初始磁导率(50Hz)。

表 2.3-66 各类超高磁导率铁镍系合金的成分及其磁性能研究水平

合金化学成分（质量分数、余为 Fe）	μ_i①	μ_m	H_c	B_s	ρ	相应的生产牌号
	(10^4)		(A/m)	(T)	($\mu\Omega\cdot$cm)	
Ni79Mo4.6	15.15	47.5	0.560	0.79	55.0	1J79
Ni79.7Mo5.1Mn0.7	16.3			0.73	60.0	1J85
Ni80.18Mo6.08	20.5	47.8	0.408	0.68	65.0	1J86
Ni81.6Cr3.67	20.0			0.78	61.0	
Ni79.27Nb8.97	12.5	49.1	0.184	0.60	74.8	1J88
Ni83V6	13.2	28.8	0.480	0.52	78.7	
Ni76.4W8.8	9.0	27.0		0.744	55.2	
Ni73Ta15.4	9.5	46.8	0.312	0.66	70.1	
Ni70.5Cu13.17	10.0	21.9	0.688	0.81	26.8	
Ni77.2Mo5Cu4	15.0	30.0	0.400	0.70	65.0	1J77
Ni79.5Nb6.2Mo3	14.2	58.0	0.240		75.0	1J87
Ni79.39Mo4.1Cr0.43	15.5	44.0	0.480	0.79		
Ni80.33Mo4.93Cr0.41	23.5					
Ni74.08Ta14.11Cr0.55	14.0			0.62	75.6	
Ni79Nb8Al1.2	9.8	40.5	0.656	0.50	80.0	1J91
Ni76.8Cu5Cr2.73	13.0			0.75	55.0	1J76
Ni78.86Mo2.58W1.83	9.2	56.2	0.416	0.87		
Ni77Cu4.5Nb9.5	12.5	56.2	0.296			
Ni80.2Nb7.3Ti1.50	10.4	45.0	0.408			
Ni74.35Mo0.45Ta13.85	12.0	56.0	0.248	0.63	69.7	
Ni80.65Mo3.21Nb1.8	17.0	31.2	0.560	0.61	64.0	1J93
Ni71Cu15Nb1.3Si2	17.4		0.400			
Ni79.5Nb2.8Ti2Al0.5	8.6			0.74		
Ni80.6Mo3.47Nb3.18Ti2.84	10.2		0.320	0.45	90	1J89
Ni78.98Nb7.13Mo2.07Al0.46	13.5	33.0	0.400	0.48	88	1J90
Ni81.32Mo3.85Nb0.46Cr0.41	14.0	22.5	0.832	0.69		
Ni79Mo4Nb1Ta1	12.5	50.0	0.160	0.60		
Ni77Nb2.8W7Al1	16.0	26.0	0.600	0.57		
Ni78.7Mo1.4Cu2.4V1.2Cr1	15.0			0.76	72.0	
Ni79.76Cr0.52 Mo4.74Cu1.87Nb0.81	17.0	29.1	0.584	0.63	70.0	1J94

① μ_i 一般在 H=0.08～0.16A/m 下测得。

4.1.2 高硬度高磁导率铁镍系合金及磁头用合金

一般的高磁导率铁镍合金，在成品退火后的硬度 H_v 不大于 120，电阻率 ρ 不大于 0.60$\mu\Omega\cdot$m。本类合金退火后的硬度 H_v 大于 120，甚至可高达 300 以上，因此耐磨性大大提高；电阻率 ρ 也增大，一般大于 0.60$\mu\Omega\cdot$m。H_v 和 ρ 的提高是由于添加了许多有效元素所致。这类合金也叫硬坡莫合金。它的另一特点是磁性的应力敏感性大大降低。硬坡莫合金适宜在应力状态和高频下应用，如用作录音磁头芯片、磁卡磁头芯片、接触式运动导磁元件及微特电机铁心等。

表 2.3-67 和表 2.3-68 为国标 GB/T 14987—1994 中五个牌号的硬坡莫合金的直流和交流性能。表 2.3-69 和表 2.3-70 为磁头外壳、隔离片和芯片用硬韧坡莫合金的性能。

表 2.3-67 硬坡莫合金的直流磁性能

合金牌号（主成分）	合金带厚度 (mm)	直流磁性能					硬度 H_v (0.1kg 负荷)
		μ_0	μ_m	H_c (A/m)	B_s (T)	电阻率 ρ ($\mu\Omega\cdot$cm)	
		不小于		不大于	不小于	不小于	
1J87 (Ni80Nb7Mo2)	0.02～0.04	30 000	100 000	2.0	0.5	75	180
	0.05～0.09	35 000	120 000	1.2			
	0.10～0.29	40 000	200 000	0.8			
	0.29～0.50	35 000	180 000	1.2			
1J88 (Ni80Nb8)	0.02～0.04	30 000	100 000	2.0	0.55	70	180
	0.05～0.09	35 000	120 000	1.6			
	0.10～0.29	40 000	150 000	1.2			
1J89 (Ni79Mo4Nb63Ti2)	0.02～0.04	15 000	70 000	2.4	0.45	85	200
	0.05～0.09	20 000	90 000	1.6			
	0.10～0.29	25 000	100 000	1.2			
1J90 (Ni79Mo2Nb6Al0.5)	0.02～0.04	30 000	100 000	2.0		85	200
	0.05～0.09	35 000	150 000	1.6			
	0.10～0.29	40 000	180 000	0.8			
1J91 (Ni79Nb8Al1)	0.02～0.04	5000	40 000	3.2		80	300
	0.05～0.09	8000	60 000	2.0			
	0.10～0.29	10 000	80 000	1.6			

表 2.3-68 硬坡莫合金的交流磁性能

合金牌号	合金带厚度 (mm)	在 B=2mT 下的磁导率 μ_i				
		1kHz	10kHz	100kHz	500kHz	1MHz
		不小于				
1J87	0.02	23 000	20 000	5500	1000	700
	0.03	25 000	17 000	4000	800	500
	0.05	26 000	9000	1800	400	200
	0.10	23 000	4500	800	—	—
1J88	0.02	22 000	20 000	4500	—	—
	0.03	24 000	17 000	3000	—	—
	0.05	22 000	9000	1500	—	—
	0.10	20 000	4500	780	—	—
1J89	0.02	12 000	10 000	5500	1200	800
	0.03	14 000	7000	4000	1000	600
	0.05	16 000	4000	1800	500	300
	0.10	13 000	2000	800	—	—
1J90	0.02	23 000	20 000	6000	1200	800
	0.03	25 000	17 000	4500	900	—
	0.05	26 000	15 000	2000	600	—
	0.10	23 000	5000	900	—	—
1J91	0.02	3900	3500	3000	1000	700
	0.03	4000	3200	1500	800	—
	0.05	4200	3000	1000	300	—
	0.10	3700	2000	500	—	—

表 2.3-69 磁头用合金带材直流磁性能（YB/T 086—1996）

合金牌号	磁导率 $\mu_{0.4}$ (H=0.4A/m)	最大磁导率 μ_m	磁通密度 B_{10} (T)	矫顽力 H_c (A/m)	ρ ($\mu\Omega$/cm)	H_v
		不小于			不小于	不大于
1J75	30 000	150 000	0.70	1.6	55	120
1J77C	30 000	100 000	0.67	2.0	55	120
1J79C	30 000	100 000	0.75	1.6	55	120
1J85C	30 000	100 000	0.68	1.6	60	120
1J87C	35 000	150 000	0.64	1.5	64	150
1J92	35 000	150 000	0.70	1.5	65	140
1J93	35 000	100 000	0.60	2.0	65	140
1J94	40 000	100 000	0.60	1.6	66	130
1J95	40 000	100 000	0.55	1.6	65	140

表 2.3-70 磁头用合金带材交流磁性能（YB/T 086—1996）

合金牌号	带材厚度 (mm)	阻抗磁导率 μ_z (H=0.8A/m)			
		0.3kHz	1kHz	10kHz	100kHz
		不小于			
1J75 (Ni75Mo2Cu6W1)	0.094	30 000	20 000	6000	1200
	0.116	25 000	18 000	5000	1000
	0.146	20 000	14 000	4000	700
	0.196	15 000	10 000	3000	500
1J79C (Ni80Mo4)	0.094	30 000	15 000	5000	1200
	0.116	20 000	12 000	4000	1000
	0.146	12 000	10 000	3000	700
	0.196	10 000	8000	2500	500
1J85C (Ni81Mo5)	0.094	30 000	20 000	7000	1500
	0.116	25 000	18 000	6000	1200
	0.146	20 000	14 000	5000	700
	0.196	15 000	10 000	3000	500
	0.32	10 000	8000	1500	300

续表

合金牌号	带材厚度 (mm)	阻抗磁导率 μ_z (H=0.8A/m)			
		0.3kHz	1kHz	10kHz	100kHz
		不小于			
1J87C (Ni81Nb5Mo2)	0.094	35 000	25 000	7000	1500
	0.116	30 000	20 000	6000	1200
	0.146	25 000	15 000	5000	800
	0.196	15 000	10 000	3000	600
1J92 (Ni81Mo1Nb3W1)	0.094	30 000	25 000	6000	1400
	0.116	25 000	20 000	5500	1200
	0.146	20 000	15 000	4500	800
	0.196	15 000	10 000	3000	600
1J93 (Ni81Nb4Mo3)	0.094	40 000	25 000	8000	1500
	0.116	35 000	20 000	7000	1200
	0.146	30 000	15 000	5000	1000
	0.196	20 000	12 000	4000	600
1J94 (Ni80Mo5Nb1Cu2Cr0.5)	0.118	—	25 000	—	1400
	0.144	—	15 000	—	1000
	0.195	—	10 000	—	700
1J95 (Ni82Mo1.5Nb0.5Si3)	0.116	—	20 000	—	1300
	0.146	—	14 000	—	700
	0.196	—	10 000	—	500

4.1.3 矩形磁滞回线铁镍系合金及应用

衡量磁滞回线矩形性的指标是剩磁比 B_r/B_s 或 B_r/B_m。一般把 $B_r/B_s \geqslant 0.85$ 的软磁合金称为高矩形比合金或矩磁合金。这类的磁滞回线形状见图 2.3-10（b）。

矩磁合金的特点是具有强的磁性宏观单轴各向异性，这是获得高矩形比的物理基础。在具有单轴磁各向异性的材料中，沿其易磁化方向磁化即可获得矩形比极高的磁滞回线。表 2.3-71 列出国标 GB_n198—1988 规定的矩磁合金及磁性能。

表 2.3-71 矩磁合金的磁性能

合金牌号（主成分）	级 别	厚度（mm）	初始磁导率 μ_i	最大磁导率 μ_m	矩形系数 B_r/B_m	矫顽力 H_c (A/m)	铁损（W/kg）		饱和磁感应 B_s（T）
							$P_{1/400}$	$P_{1/3k}$	
			不小于			不大于			
1J34 (Ni34Co29Mo3)		0.005～0.01	—	50 000	0.90	20	—	—	1.50
		0.02～0.04		60 000	0.90	16			
		0.05～0.09		90 000	0.90	9.6			
		0.10～0.20		110 000	0.87	8.0			
1J51 (Ni50)	Ⅰ	0.005	—	15 200	0.80	40	—	—	1.50
		0.01		20 000	0.83	32			
		0.02～0.09		40 000	0.85	20			
		0.10		40 000	0.85	18			
	Ⅱ	0.01	—	35 200	0.87	20	—	—	
		0.02～0.04		60 000	0.92	15	4.0		
		0.05～0.09		60 000	0.92	15	4.5		
		0.10		60 000	0.90	15	5.0		
	Ⅲ	0.01	—	60 000	0.91	15			1.52
		0.02～0.04		76 000	0.94	13	—	—	
		0.05		80 000	0.94	11			

续表

合金牌号（主成分）	级别	厚度（mm）	初始磁导率 μ_i	最大磁导率 μ_m	矩形系数 B_r/B_m	矫顽力 H_c（A/m）	铁损（W/kg）		饱和磁感应 B_s（T）
							$P_{1/400}$	$P_{1/3k}$	
			不小于			不大于			
1J52（Ni50Mo2）		0.02～0.04	—	50 000	0.90	20	—	—	1.40
		0.05～0.10		70 000	0.90	16			
1J65（Ni65）		0.005～0.01	—	80 000	0.90	8.0	—	—	1.30
		0.02～0.04		100 000	0.90	6.4			
		0.05～0.09		150 000	0.90	4.8			
		0.10～0.50		220 000	0.90	3.2			
1J67（Ni65Mo2）		0.02～0.04	—	160 000	0.90	6.4	—	—	1.20
		0.05～0.09		200 000	0.90	4.8			
		0.10～0.19		250 000	0.90	4.0			
		0.20～0.50		350 000	0.90	3.2			
1J83（Ni79Mo3）		0.005～0.01	4000	50 000	0.80	5.6	—	—	0.82
		0.02～0.04	7000	100 000	0.80	4.0			
		0.05～0.09	7000	150 000	0.80	2.4			
		0.10	16 000	180 000	0.80	1.6			
1J403（Ni40Co25Mo4）	Ⅰ	0.02	—	400 000	0.97	3.2	3.0～4.5	35～65	1.38
		0.05		500 000	0.97	2.4	3.0～4.5	35～65	
	Ⅱ	0.02	—	300 000	0.95	4.0	3.0	35	
		0.05		400 000	0.95	3.2	3.5	40	
		0.10		500 000	0.95	2.4	2.5	30	

注 1. 饱和磁感应强度 B_s，对 1J34、1J51、1J52 和 1J403 合金是在 2000～2400A/m 磁场下测量；对 1J65、1J67 和 1J83 合金是在 800A/m 磁场下测量。

2. 铁损 $P_{1/400}$、$P_{1/3000}$ 分别表示频率为 400Hz、3kHz，磁感应强度峰值为 1T 时的铁损。

3. 矩形系数 B_r/B_m 中的 B_m 是在磁场强度为 80A/m 时的磁感应强度值。

4. 1J403 合金Ⅰ级产品的铁损应分别在－40℃、＋20℃和＋100℃，温度下测定。

矩磁合金按其制造方法可分为晶粒取向矩磁合金和磁畴取向矩磁合金。

利用晶粒取向获得矩磁合金，是通过适当的加工工艺，添加适量的合金元素 Mo，形成（100）〔110〕立方织构，以获得较高的矩形比和磁性能。1J51 和 1J52 即为这类合金。改善这类合金的磁性能，除了完善立方织构、添加合金元素外，还可采用纵向磁场热处理的方法。表 2.3-72 列出了当今这类合金的磁性水平。

表 2.3-72　　矩形回线 Ni50 型合金的实验室水平

牌号	主要成分	厚度（mm）	$\mu_m\times10^4$	H_c（A/m）	B_r/B_m	B_s（T）	ρ（$\mu\Omega\cdot$cm）	T_c（℃）
Deltamax	Ni50Fe 立方织构	0.05	22	4.9	0.98	1.51	45	500
50НП-ВИ	Ni50Fe 立方织构、真空感应炉	0.05	25.5	4.0	0.98	1.60	45	500
50НП-ЭЛ	Ni50Fe 立方织构、电子轰击炉	0.05～0.10	17～34	8.0～2.4	0.94～0.98	1.55～1.60	45	500
50НП-ПД	Ni50Fe 立方织构、等离子体电弧重熔	0.05	39.2	3.2	0.97	1.58	45	500
1J51	Ni50Fe 立方织构、纵磁处理	0.05	36～38	2.8～3.2	0.98～0.99	1.50	45	500
1J52	加 2%Mo 立方织构	0.05	10	8	0.90	1.40	60	

在高镍含量（含 80%Ni 左右）的铁镍合金中，采用上述类似的工艺也可获得立方织构，其性能如表 2.3-73 所示。但由于镍含量提高，加入更多的 Mo 不利于形成完善的立方织构，因此，这类合金的生产工艺要求极其严格，而且它的矩形比很难达到 0.95 以上。这类合金尚未列入我国国家标准中，表 2.3-73 中的 1J86j（Ni81Mo6）是首钢冶金研究院独家生产的牌号。类似的高镍矩磁合金有表 2.3-71 中的 1J83，其性能比 1J86j 低很多。

表 2.3-73　　某些高镍矩磁合金的成分及性能

国别	牌号	主要成分（Me 指合金元素）	厚度（mm）	$\mu_m\times10^4$	H_c（A/m）	B_r/B_m	B_s（T）	ρ（$\mu\Omega\cdot$cm）
德国	UltrapermZ	Ni75～80＋Me	0.05	2.5	0.8	0.91	0.80	55
美国	79Sguaremu	Ni79＋Me	—	7	6.4	0.93	0.80	58
法国	Pulsimphy	Ni77＋Me	0.10	7	4.8	0.94	0.75	58

续表

国 别	牌 号	主要成分（Me 指合金元素）	厚度（mm）	$\mu_m\times10^4$	H_c（A/m）	B_r/B_m	B_s（T）	ρ（$\mu\Omega\cdot$cm）
英国	Orthomumetal	Ni77+Me	—	—	2.4	0.87	0.80	58
日本	—	Ni81Mo6（立方织构）	0.05	135	0.28	0.92	0.60	65～70
	RC-R	Ni80Mo	—	59	0.64	0.92	0.62	60
中国	1J86j	Ni81Mo6（立方织构）	0.05	44.8	0.66	0.90	0.60	65～70

表 2.3-74　　利用热磁感生各向异性的矩形回线合金的性能水平

牌 号	主要成分	厚度(mm)	$\mu_m\times10^5$	H_c(A/m)	B_r/B_m	B_s(T)	$\rho(\mu\Omega\cdot$cm)	T_c(℃)
65-Permalloy	Ni65	—	15	0.9	0.98	1.39	26	600
65НП	Ni65	—	4	4.0	0.98	1.35	25	600
65-Permalloy	Ni65	0.15	28	0.52	0.96	—	26	600
1J65	Ni65	0.15	22	3.2	0.87	1.30	26	600
Dynamax	Ni65Mo2	0.05	1.78	0.42	0.98	1.25	46	560
68НМП	Ni65Mo2	—	12	0.64	0.95	1.30	47	560
PermaxZ	Ni65Mo2～3	0.05	2.5	2.0	0.95	1.25	60	520
1J67	Ni65Mo2	0.05	10.9	0.66	0.93	1.35	46	560
Ge-Permalloy	Ni65Ge4	—	16	0.14	0.99	1.22	40	530
40НКМП	Ni40Co25Mo4	0.05	8	1.2	0.98	1.40	63	600
1J40	Ni40Co25Mo4	0.05	12.75	1.6	0.99	1.42	65	600
34НКМП	Ni34Co29Mo3	—	2	4.0	0.95	1.55	50	
1J34	Ni34Co29Mo3	0.02	3.65	3.4	0.96	1.50	50	620
37НКДП	Ni37Co26Cu3	—	10	0.8	0.99	1.55	30	570
35НКСХП	Ni35Co28Cr2Si	—	6	1.6	0.95	1.40	60	560

磁畴取向矩磁合金，是通过磁场处理，使各畴的磁矩沿外磁场方向排列，形成磁畴取向，沿该方向磁化就可获得矩形回线。这类合金的成分有两类，一类是镍含量在65%左右的铁镍合金，如表2.3-71中的1J65、1J67合金；另一类是镍加钴含量在65%左右的铁镍钴合金，如表2.3-71中的1J34、1J403合金。为了改善合金的交流磁性能，提高电阻率，常在这二类合金中加入少量的Mo、Cr、Ge、Si等元素。表2.3-74列出了该类合金的性能水平。除了添加合金元素外，还可利用提高磁场热处理时的冷却速度（适当降低矩形比）或降低高温退火温度（H_c略增），形成细畴、细晶结构来改善合金的交流磁性能。

图2.3-19为1J51、1J67和1J86j三个不同Ni含量的矩磁合金的磁滞回线比较。

矩磁合金主要用于制造大、中、小功率的双极脉冲变压器、磁放大器、磁调制器、方波变压器的铁心，也可制作计算机系统的记忆和存储器、尖峰抑制器等。

4.1.4 高 ΔB 和恒磁导率合金及应用

高ΔB和恒磁导率合金的共同特点是具有低剩磁B_r，其磁滞回线形状为扁平型，见图2.3-10（c）。ΔB是指磁感应强度B与剩磁B_r之差，即$\Delta B=B-B_r$。这里的B可以是某工作磁场（H_m）的磁感应强度（B_m），也可以是磁化到饱和时的饱和磁感应强度（B_s）。一般，B_m或B_s为定值，故要ΔB高，B_r就必须小。这类合金的特点是初始磁导率和最大磁导率的差别很小，一般小于30%；矩形比也很小，一般小于0.2。

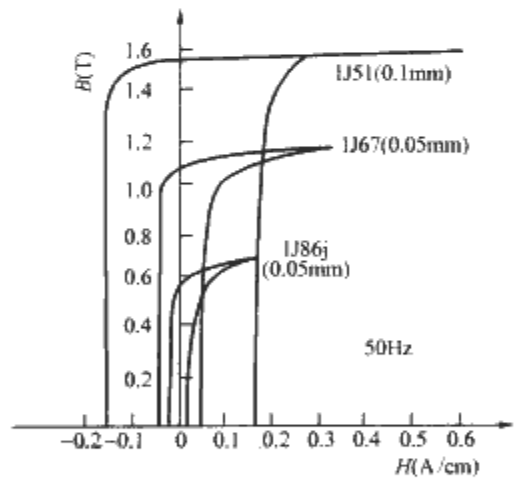


图2.3-19　不同Ni含量的三种矩磁合金的磁滞回线

形成扁平回线的先决条件也是合金应具有强的单轴各向异性。如果磁化在这种单轴各向异性的易磁化轴的垂直方向进行，磁化过程基本上靠磁畴转动来完成，这样就获得低B_r的扁平回线。若其他干扰因素很小时，则可获得恒磁导率特性。在铁镍系坡莫合金中，可利用横向磁场处理产生单轴磁感生各向异性或者在一定条件下冷变形，产生滑移感生各向异性来实现单轴各向异性。

工业生产中常用的高ΔB合金有两类：一类是高镍坡莫合金，另一类是中镍坡莫合金。前者磁导率高，后者ΔB值大。其性能见表2.3-75和表2.3-76。两类合金的脉冲磁导率曲线见图2.3-20。脉冲性能对比见表2.3-77和表2.3-78。

表 2.3-75　　低 B_r 扁平回线的高镍坡莫合金

牌　号	主要成分	μ_i	B_r/B_m	$\Delta B_8=B_8^{①}-B_r$ 不大于	B_s（T）不小于	H_c（A/m）	ρ（$\mu\Omega\cdot$cm）
中 1J79H	Ni79Mo4CrNb	40 000	0.20	0.60	0.80	1.0	60
	Ni79Cr2Cu5	8000	0.20	0.60	0.80	—	55
德 UltrapermF	Ni72～83MoCu	12 000	0.05～0.15	0.40～0.60	0.74	0.7～1.2	50
德 UltrapermFF	Ni72～83MoCu		0.05～0.10	—	0.74	1.2	50
德 Ultraperm80	Ni72～83MoCu		0.15～0.25	—	0.74	0.5	50
俄 Н3М	Ni79Mo3	20 000	0.20	0.70	0.78		55

① B_8 为 $H=8$A/cm 时的磁感值。

表 2.3-76　　低 B_r 扁平回线的中镍坡莫合金

牌　号	主要成分	μ_i	B_r/B_m	$\Delta B_8=B_8-B_r$ 不小于	B_s/T（A/m）	ρ（$\mu\Omega\cdot$cm）
俄 47НК	Ni47Co23	900～1100	0.05	—	—	20
俄 47НКХ	Ni47Co23Cr2	1500～2000	≤0.05	1.1	1.35	48
俄 64Н	Ni47	2000	0.07	1.3	1.35	30
中 1J34H	Ni34Co29Mo	1000	≤0.1	1.2	1.50	50
中 1J40H	Ni40Co25Mo	2000～4000	≤0.1	1.2	1.40	55
中 1J34KH	Ni34Co29Nb	600	≤0.1	1.3	1.60	28
中 1J50H	Ni50	100	≤0.1	1.3	1.50	45
中 1J66	Ni65Mn1	3000	≤0.05	1.3	1.35	27
中 1J67H、1J672	Ni65Mo2	4000	≤0.2	1.2	1.25	60
中 1J6721	Ni65Mo2（立方织构）	8000	≤0.2	1.2	1.25	60
中 1J512	Ni50（立方织构）	12 000	≤0.1	1.3	1.50	45
德 PermaxF	Ni54～58	4000	0.1	0.8	1.25	45
德 Permenorm5050F	Ni45～50	6000	≤0.1	1.1	1.52	45
德 Hyperm54	Ni54	5000	≤0.1	1.2	1.30	45

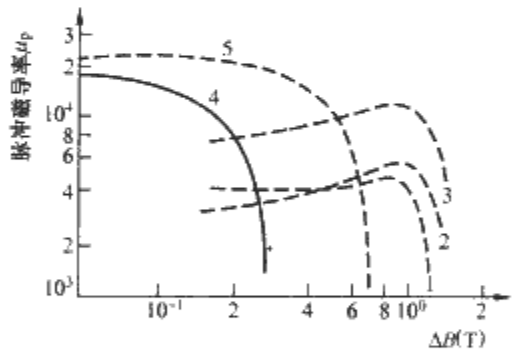


图 2.3-20　脉冲磁导率 μ_p 与 ΔB 的关系

曲线 1：厚 0.05mm，脉宽 50μs，各向同性 Ni65Mo2.5 合金（横磁处理后）（即 1J67H）。

曲线 2：厚 0.05mm，脉宽 50μs，各向同性 Ni50Fe 合金（横磁处理后）。

曲线 3：厚 0.05mm，脉宽 50μs，（100）［001］织构的 Ni50Fe 合金（横磁处理后）（即 1J512）。

曲线 4：厚 0.03mm，脉宽 10μs，各向同性 Ni77MoCu 合金（T_c 以上高 μ 退火后）。

曲线 5：厚 0.03mm，脉宽 10μs，各向同性 Ni77MoCu 合金（横磁处理后）（即 1J79H）。

表 2.3-77　　低 B_r 高 Ni 合金的脉冲性能

续表

国别	牌　号	厚度（mm）	脉宽（μs）	脉冲性能		损耗 $P_{0.3/20k}$（W/kg）
				ΔB_s（T）	脉冲磁导率 μ_p	
中国	1J79H	0.03	1	0.20	3500	—
				0.30	3100	—
				0.40	2900	—
德国	UltrapermF	0.05	10	0.40	4900	≤45
		0.03	10	0.40	7000（21 000）	≤25
			20	0.40	10 000	—
		0.006	2	0.40	8000（13 000）	—
俄罗斯	79Н3М	0.02	—	0.125	5000	—
		0.01		0.175	7000	—
		0.005		0.20	8000	—

注　1. 括号内数据为实验室最高水平。

2. 79Н3М 合金的脉冲性能是在 $H=20$A/m 的磁场中测得。

添加合金元素可影响磁场处理效果，例如加钼使 $|K_1|$ 增大，对磁场处理效果不利。加适量锰或铌使合金的饱和磁感应强度（B_s）增加，$|K_1|$ 不变或减小，对磁场处理效果有利。

立方织构的存在对高镍合金不利，因为大多数高镍合金的 $K_1<0$，〈100〉晶向为难磁化方向。但立方织构的存在对中等镍含量的合金有利，此时在轧向（即使用时的磁化方向）是 K_u 的难磁化方向和 $K_1>0$ 的〈100〉易磁化方向的叠加，获得了图 2.3-21 所示的低 B_r 回线。这种回线合金在保持大的 ΔB 的情况下提高了 μ_m 值，表 2.3-76 中的 1J512，1J6721 即是这类合金。

表 2.3-78 低 B_r 中 Ni 合金的脉冲性能

国别	牌号	厚度 (mm)	脉宽 (μs)	脉冲性能		损耗 $P_{0.3/20k}$ (W/kg)
				ΔB_s (T)	脉冲磁导率 μ_p	
中国	1J672	0.025	3	0.65	1400	—
	1J6721	0.025	3	0.65	2200	—
				0.85	1760	—
	1J512	0.025	3	0.71	6000	—
				0.90	5700	—
				1.25	4500	—
德国	PermaxF	0.05	10～50	0.80	2300～4000	($P_{0.3/10k}$≤28)
		0.03	10	0.80	2800	≤44
		0.015	10～50	0.80	2400～3000	≤30
	Hyperm54	0.05	10	1.00	2700	—
			20	1.00	4000	—
			50	1.00	5400	—
	Permenorm 5050F	0.05	50	1.10	6000	($P_{0.3/10k}$≤20)
俄罗斯	68HM	0.02	—	0.60	6000	—
	53H-BИ	0.02	—	1.00	10 000	—
			—	1.25	6250	—

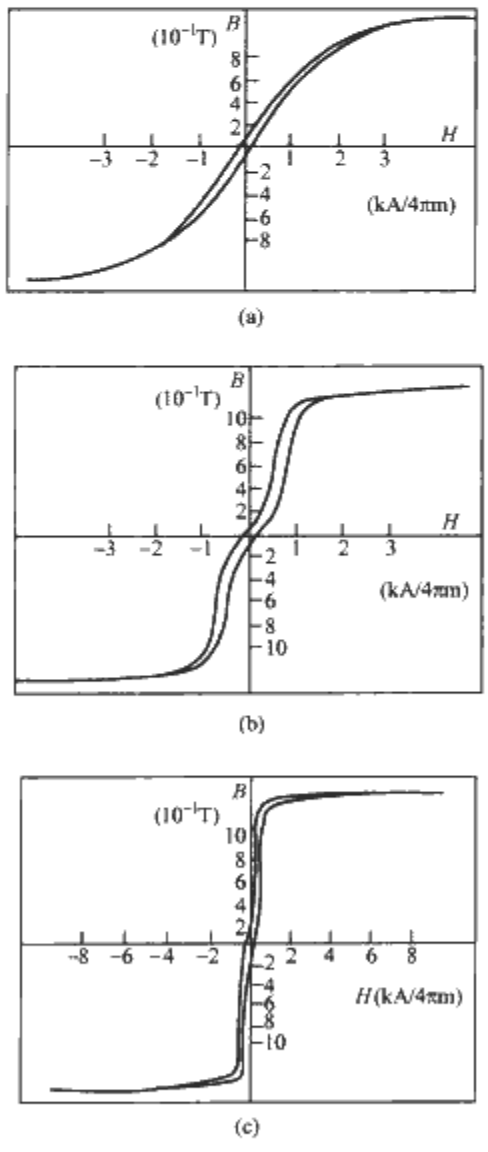


图 2.3-21 立方织构对低 B_r 合金磁滞回线的影响
(a) 无取向 Ni65Mo2 合金 (1J672)；
(b) 立方织构 Ni65Mo2 合金 (1J6721)；
(c) 立方织构 Ni50Fe 合金 (1J512)

有序化对热磁退火处理形成同类原子对的方向有序不利，所以在热处理高镍合金时，横磁处理不能采用在居里温度 (T_c) 以上缓慢冷却的方法，而应该在 T_c 以下，在远离有无序转变的某温度下等温横磁处理，保温较长时间。一般横磁处理温度不超过 400℃。对于中等镍含量的合金，由于有序化影响很小，故可采用从 T_c 以上某温度缓慢冷却的横磁处理方法。当在横向磁场中减慢冷却速度时，K_u 增加，ΔB 增加，μ_m 降低，磁导率的恒定性提高。

为了提高横磁处理效果，还可使合金含有一定量的氧 (一般 O_2 达 0.02%～0.04%)。氧的存在，增加了空位浓度，加速原子扩散过程，有利于形成同类原子对的方向有序，从而提高热磁处理的效果。

高 ΔB 合金主要用作各种单极性脉冲变压器、晶体管防护扼流圈、电感元件、滤波元件、充电电感、漏电断路器用互感器及电子线路中的输出、反馈、耦合变压器铁心等。

恒导磁合金是指在一定的磁场范围内，磁导率比较恒定的材料。众所周知，软磁材料的磁感应强度和磁场强度间存在非线性的函数关系 (回线关系)，不同磁场下的磁导率不同。一般，具有正常磁滞回线的合金的初始磁导率和最大磁导率之间相差 5～10 倍，矩形磁滞回线的合金则可差 10～100 倍，而扁平回线的合金的差别小于 30%。理想的恒导磁合金的 B_r 和 H_c 应趋于零，回线形状应如图 2.3-22 所示，其磁导率在 H_0 以下完全恒定。在实际材料中，B_r 和 H_c 虽然很低，但达不到零。而且由于各种因素的影响，低 B_r 回线的形状有很多种，如图 2.3-23 所示，故磁导率并不都恒定。定义磁导率的恒定系数 α 为 $(\mu_{max}-\mu_{min})/\mu_{min}$，一般把 α≤10%的低 B_r 合金叫做恒磁导合金。

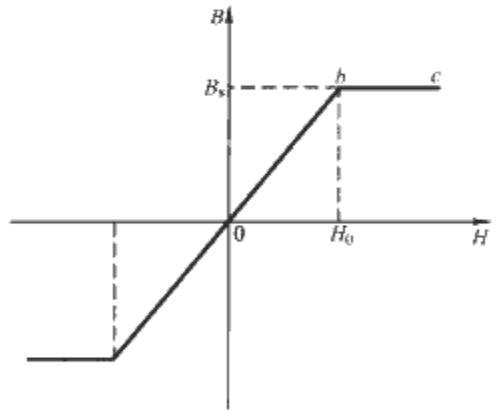


图 2.3-22 恒导磁合金的理想磁化曲线和磁滞回线

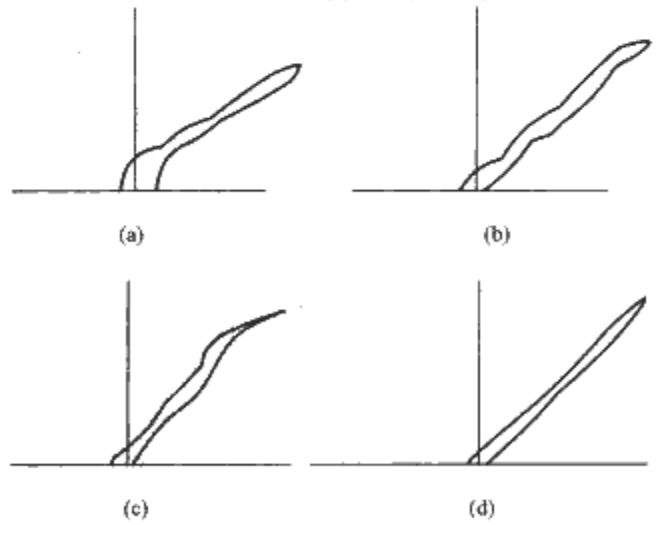


图 2.3-23 各种低 B_r 扁平回线的形状
(a) 粗腰形；(b) 多变形；(c) 蛇形；(d) 直线形

利用横向磁场热处理，可获得磁导率很高的低 B_r 扁平回线铁镍系坡莫合金，其中我国发明的 1J66 (Ni65Mn1Fe)

合金（GB/T 15003—1994），其磁化曲线最接近于理想的恒磁导率合金（见图 2.3-22），不仅磁导率高（约 3000），而且在交流（0～240A/m）、交直流叠加、温度（－60～+90℃）、频率（0～10kHz）等变化条件下仍有良好的恒定性，其磁性能见表 2.3-79。

表 2.3-79　1J66 恒导磁合金的性能和热处理工艺（GB/T 15003—1994）

合金牌号	厚度（mm）	级别	感应磁导率 μ_L ≥	交流稳定值① $\alpha\sim$ ≤1%	交直流稳定值② $\alpha\perp\!\!\!\perp$ ≤1%	温度稳定值 α_T ≤1%
1J66②	0.55～0.10	Ⅰ	2800	10	9	8
		Ⅱ	3000	7	6	5

① 热处理工艺

(1) 氢气或真空 1200℃×1h 以 100℃/h 冷到 600℃，炉冷到 300℃。

(2) 横向磁场处理 $H=16$kA/m，650℃×1h，以 50～100℃/h 冷却到 200℃出炉。

② $\alpha\sim=(\mu_{L\max}-\mu_{L\min})/\mu_{L\max}$（$f=50$Hz，$B=0\sim0.6$T 内测得最大和最小的感应磁导率）。

$\alpha\perp\!\!\!\perp=(\mu_L-\mu_{L56})/\mu_L$（在 $f=60$Hz，$B=0.03$T 测 μ_L，叠加直流 $H=56$A/m测得 μ_{L56}）。

$\alpha_T=(\mu_{L90}-\mu_{LRT})/\mu_{LRT}$或$(\mu_{LRT}-\mu_{L-60})/\mu_{LRT}$取其中较大值者。（$\mu_{L90}$，$\mu_{LRT}$，$\mu_{L-60}$分别在 90℃，室温－60℃下的感应磁导率，在 $f=60$Hz，$B=0.03$T 条件下测得）。

图 2.3-24 为各类低 B_r 合金的 μ 值及其基本恒定的磁场范围。恒导磁合金可作为交流电感元件、恒电感元件和电子线路中的输出、反馈元件，以及耦合变压器和单极性脉冲变压器的铁心。

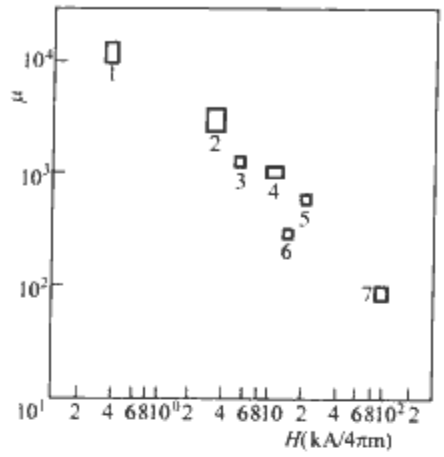


图 2.3-24　各类低 B_r 合金的磁导率及其恒定的磁场范围

1—1J792；2—1J66；3—Ni47Co23Cr；4—1J34H 和 Ni47Co23；5—1J34kH；6—恒导磁硅钢；7—1J50H 和 Ni36Cu9

4.1.5　具有较高 B_s 的高磁导率铁镍系合金

中镍（Ni46%～68%）合金的显著特点是 B_s 大（1.3～1.6T），采用不同的制作工艺不仅可获得矩形和扁平型磁滞回线的合金，也可获得普通回线的合金。表 2.3-80 和表 2.3-81 列出 GB_n198—1988 中这类合金的性能，类似的其他合金见表 2.3-82。

表 2.3-80　高磁导率较高饱和磁感应强度软磁合金的直流性能（GB_n198—1988）

合金牌号	产品种类	级别	厚度或直径（mm）	在 0.4A/m 下的磁导率 $\mu_{0.4}$	最大磁导率 μ_m	矫顽力 H_c（A/m）	饱和磁感应 B_s（T）
				不小于		不大于	
1J46（Ni46Fe）	冷轧带材		0.02～0.04	1280	18 000	32	1.5
			0.05～0.09	1600	22 000	24	
			0.10～0.19	2000	25 000	20	
			0.20～0.34	2480	30 000	16	
			0.35～2.50	2800	36 000	12	
	热轧（锻）扁材		3～22	2000	25040	16	
	热轧（锻）棒材		8～100	2000	25040	16	
1J50（Ni50Fe）	冷轧带材	Ⅰ	0.05～0.09	2000	28 000	20	
			0.10～0.19	2320	32 000	14.4	
			0.20～0.34	2640	40 000	11.2	
			0.35～0.50	3040	50 000	9.6	
			0.51～1.00	3040	50 000	9.6	
			1.10～2.50	2800	45 000	9.6	
		Ⅱ	0.10～0.19	3040	35 000	12	
			0.20～0.34	3520	45 000	10.4	
			0.35～0.50	4000	52 000	8.8	
			0.51～1.00	4000	40 000	10	
			1.10～2.50	3040	35 200	12	
		Ⅲ	0.05～0.20	10 000	60 000	4.8	1.52
	热轧（锻）扁材		3～22	2480	25 040	14.4	1.5
	热轧（锻）棒材		8～100	2480	25 040	14.4	

续表

合金牌号	产品种类	级别	厚度或直径（mm）	在0.4A/m下的磁导率 $\mu_{0.4}$	最大磁导率 μ_m	矫顽力 H_c（A/m）	饱和磁感应 B_s（T）
				不小于		不大于	
1J54（Ni50Cr4）	冷轧带材	Ⅰ	0.005	1000	8000	56	1.0
			0.01	1280	10 000	40	
			0.02～0.04	1520	16 000	20	
			0.05～0.09	2000	20 000	16	
			0.10～0.19	2480	25 040	12	
			0.20～0.34	3040	28 000	9.6	
			0.35～0.50	3200	32 000	8	
			0.51～1.00	3040	32 000	8	
		Ⅱ	0.02～0.04	3040	24 800	12	
			0.05～0.09	3040	24 800	12	
			0.10～0.19	3120	28 000	10	
			0.20～0.34	3120	30 000	10	
			0.35～0.50	3520	35 200	8	
	热轧（锻）扁材		3～22	1600	16 000	20	
	热轧（锻）棒材		8～100	1600	16 000	20	

注 饱和磁感应强度 B_s 用2000～2400A/m外磁场强度测量。

表 2.3-81 高磁导率较高饱和磁感应强度软磁合金的交流性能

合金牌号	产品种类	级别	厚度（mm）	在0.4A/m、不同频率下的弹性磁导率 μ_1			
				60Hz	400Hz	1kHz	10kHz
				不小于			
1J50（$Ni_{50}Fe$）	冷轧带材	Ⅱ	0.02	—	—	2000	1600
			0.05	—	—	2000	1440
			0.10	—	3120	3040	—
			0.20	—	3040	2400	—
			0.35	4000	3040	—	—

表 2.3-82 某些含合金元素中Ni合金的磁性能

主要成分（质量分数，余为Fe）	厚度（mm）	μ_i	μ_m	H_c（A/m）	B_s（T）	ρ（μΩ·cm）
Ni50Si	0.1	13 000	90 000	4.8	1.42	51
Ni50Si4	0.1	25 000	80 000	3.2	1.14	80
Ni45Cu5	—	2000	20 000	8.0	1.56	55
Ni45Cr6	—	6000	35 000	—	—	—
Ni50U0.21	0.1	10 200	122 600	1.8	—	—
Ni50V0.05	0.1	48 300	75 600	4.0	—	—
Ni50Al0.22	0.1	82 300	96 800	2.4	—	—
Ni50Ge2	0.1	15 000	100 000	2.8	1.37	50
Ni46Co2Cu3	0.1	18 300	158 000	2.3	1.40	67
Ni38Cr8	0.1	20 000	12 500	1.36	0.75	95

1J50（Ⅱ）级合金的交流磁特性曲线见图2.3-25和图2.3-26。这类合金磁导率较高的原因是因为在易磁化方向[100]中的 λ_{100} 趋于零之故（合金的 $K_1>0$，见图2.3-11）。但由于 K_1 不趋于零，故磁导率比高镍合金低些。

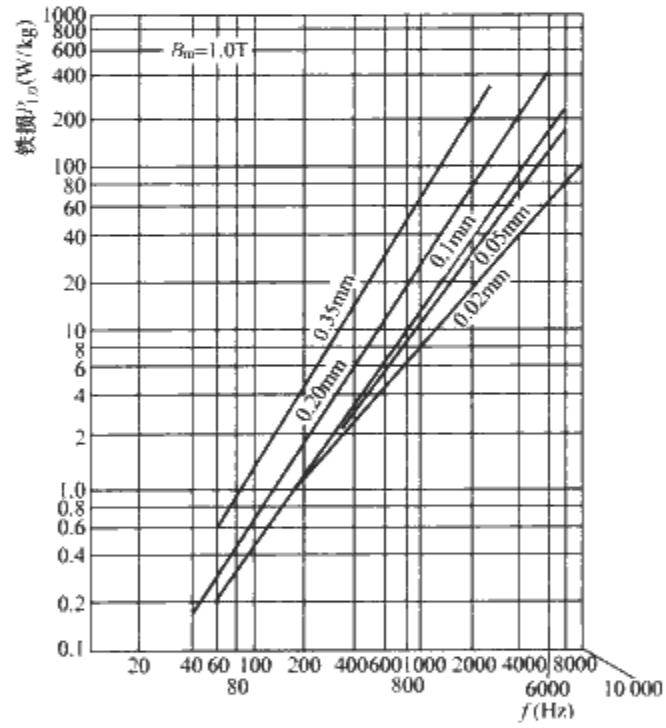


图2.3-25 1J50合金铁损与频率的关系曲线（B_m=1.0T）

另外，由于这类合金没有 Ni_3Fe 有序—无序转变，K_1 值基本上不受热处理时冷却速度的影响（图2.3-11）。因此相对于高镍合金而言，其热处理工艺要简单得多。这类合金的 B_s 值比高镍合金大约一倍。但多年来由于其磁导率水平较低，故使用受到一定的限制。近年来由于大面积集成电路和固体电路的飞速发展，电子元件已大大微小型化，因此越来越要求使用高磁感且高磁导率低损耗的材料，以缩小磁性元件的重量和体积。这样，改进这类高 B_s 的中Ni合金的磁性就成为主要任务。现在认为改善这类合金磁性能的主要途径有：

（1）提高合金的纯度。现在一般认为降低合金的氧、硫、磷等气体杂质的含量，提高合金纯度对改善中Ni合金磁性的效果要比高Ni合金大，这是因为前者的 K_1 大，畴壁

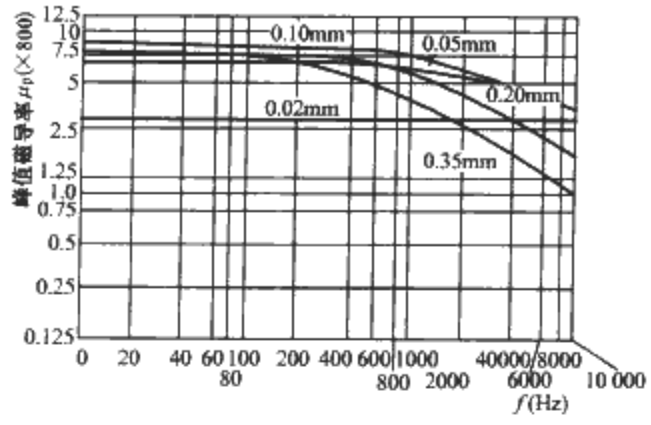


图 2.3-26 1J50 合金磁导率与频率的关系曲线（H=0.4A/m）

窄，夹杂对畴壁运动的影响较大之故。

（2）加适量的合金元素。如添加 Si、Cu、V、Cr、Al、Ge 等，可改善软磁性能。这个方法的缺点是由于加了合金元素使合金的 B_s 值有不同程度的降低。

（3）在最终高温退火后，获得适宜的组织结构下，再在居里点以下进行所谓等温纵向磁场处理，这不仅提高 μ_m 值，也提高 μ_i 值。这个方法比较方便，而且效果也大。

图 2.3-27 示出利用提高合金纯度和磁场热处理方法使中镍合金的磁导率水平大幅度提高的情况。目前这类合金的 μ_i 和 μ_m 值已达到高镍合金的水平。表 2.3-83 列出各国的商品牌号性能水平，并与我国研制的 1J50cd 和 1J55 合金作了对比。

我国标准中没有这种牌号，但现在已有不少单位生产和使用这类材料。由表 2.3-83 可知，这类合金的镍含量范围较宽，一般控制在 50%～56%Ni 左右。这时合金的 B_s 值和 ρ 值都较高。若镍含量过高，B_s 和 ρ 就会下降。添加合金元素如钼，虽可使 ρ 提高，但使 B_s 值下降。

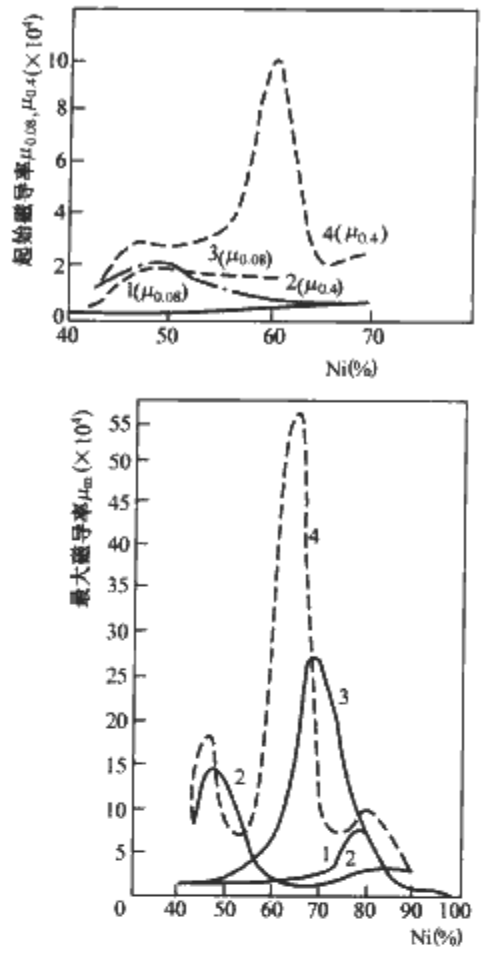


图 2.3-27 二元 Ni—Fe 合金磁导率的改进

1—Bozorth，1951；2—Felenbrach，提高合金纯度，1965；3—Rassmann，磁场处理，1960；4—Falenbrach，磁场处理，1965

（$\mu_{0.4}$、$\mu_{0.08}$ 为 H=0.4A/m 和 0.08A/m 的起始磁导率）

表 2.3-83 改进的高磁导率较高饱和磁感应强度中镍合金磁性水平

国别	牌号	成分（余为 Fe）	厚度（mm）	直流磁性					50Hz 交流磁性				
				$\mu_{0.16}$① ×10⁴	$\mu_{0.4}$① ×10⁴	μ_m ×10⁴	H_c A/m	B_s (T)	$\mu_{0.16}$① ×10⁴	$\mu_{0.4}$① ×10⁴	μ_m ×10⁴	H_c A/m	$P_{1.0}$ W/kg
中国	1J50cd	Ni50	0.05	2.5	6.65	18.1	1.8	1.5					
			0.1	3.5	6	24.3	2.4	1.5					
	1J55	Ni55	0.1	11.15	37.9	55.5	0.6	1.53					
		Ni58Mo2	0.05	3.25	35.6	35.6	1.3	1.37					
		Ni60	0.1	13.5	80	88	0.48	1.32					
英国	Satmumetal	Ni50	0.1	3.5	6.5	24	2.0	1.5					0.11
	Super Radiometal				1.1	10	8	1.6					0.1～0.16
德国	Permax M	Ni50～55	0.1		5	12.5	1.2	1.5		4			
		Ni57	0.15		10		1.2			7		8	
		Ni60		7.8	10	28			2.8	4	7		
		Ni63	0.15		9	40	1.6			6	11		
	Hypermte（VS37）	Ni55	0.1		5	12	0.8	1.45	3.5	5.5	15	8	
			0.15					1.45	4.9	6.7	12	14	0.12
			0.2		11	40	1.3	1.45	3.2	4.2	9.4	22	
	VS125	Ni65Mo3	0.2	14	21	40	0.64	1.15	7.5	10.4	15	5.6	
	VS36	Ni50Mc								3.6	8.3		
美国		Ni58	0.1	3.2		38							
		Ni55	0.08							10.0	18.0		

续表

国别	牌号	成分（余为Fe）	厚度（mm）	直流磁性					50Hz交流磁性				
				$\mu_{0.16}$① ×10⁴	$\mu_{0.4}$① ×10⁴	μ_m ×10⁴	H_c A/m	B_s (T)	$\mu_{0.16}$① ×10⁴	$\mu_{0.4}$① ×10⁴	μ_m ×10⁴	H_c A/m	$P_{1.0}$ W/kg
日本	PB—25	Ni45Mo	0.2		4	20	3.2	1.5					
俄罗斯	50H—ВИ	Ni50	0.1		4	30	1.6	1.6					
			0.05		1.5	25	2.0	1.6					
法国	Satimphy	Ni53	0.1		5	12.5	1.2	1.5					
		Ni55						1.5		6	12		

① $\mu_{0.16}$、$\mu_{0.4}$为H=0.16A/m、0.4A/m时的起始磁导率。

这类合金的热处理分两步进行：第一步是高温退火，第二步为纵向磁场处理。磁场处理的温度十分重要，当温度较高（如470℃）时，可得到高μ_i和μ_m而B_r/B_m不高的性能；当温度较低（如430℃）时，则可得到低μ_i和高B_r/B_m的性能，图2.3-28为1J50cd合金的磁性能及与其他合金的比较曲线。

中Ni高μ合金已在部分应用领域替代高Ni高μ合金。

4.1.6 高频应用的高导磁合金

现代科技的飞速发展，使许多磁性器件的工作频率越来越高。表2.3-84列出某些技术的工作频率范围。

表2.3-84 某些应用技术的频率范围

应用技术	频率范围（Hz）
电源变压器	50～50k～1M
感应加热电源	400～100k
功率变压器	50～10M
开关电源	20k～1M～10M
	PC电源开关频率100～500k
	笔记本电脑开关频率≥5M
	微型开关变压器1～10M
逆变电源	已达50k
高密度磁记录	1～100M
电感元件	一般1～10M
	共模电感达30M以上
	叠片电感达60G
移动通信	800M增加到2.4G
卫星通信	10G数量级～10^2G数量级
扼流圈、滤波器	一般1k～1M
	噪声滤波器100M～1G
磁屏蔽	<几k
电磁屏蔽	<1000G

在输出功率方面的要求也越来越高，如在几十千赫兹时输出或传递功率达几MW；100～500kHz时达几百千瓦；1MHz下达几十瓦；模块电源功率密度达100W/in³以上。研究表明用约20～25μm厚的Fe基纳米晶软磁合金，在20～50kHz下，铁心传递或输出的能量达15W/g，最好的可达25W/g。

在电感量（L）要求方面如在MHz频段时电感量L达几百微亨以上；在GHz频段时L>1000nH。

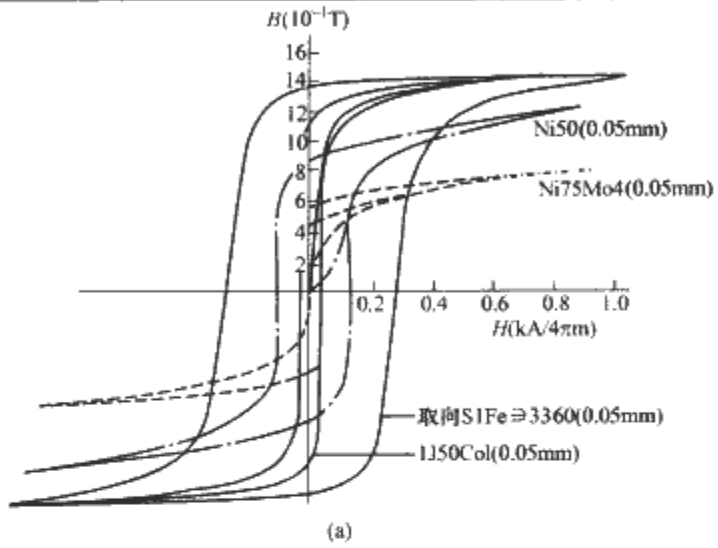


图2.3-28 1J50cd合金的磁性能及与其他合金的比较

（a）磁滞回线和磁化曲线对比；（b）最大磁导率与频率的关系曲线；（c）损耗的频率特性曲线

为了满足上述技术要求，使重量减轻，体积缩小；降低损耗提高效率；增加散热延长寿命；简化生产工艺降低成本，磁性器件在高频化的同时，还向平面化、集成化、模块化和阵列化方向发展，因此要求所用软磁材料从三维向二维材料发展（厚度越来越薄），要求高频下铁损低，磁导率高，提高 B_s 和电阻率（ρ）。

金属软磁材料在高频中的应用将越来越受到挑战，除上述应用频率越来越高外，还因为近年来大量采用固态化、集成化、微组装等新技术，使电子产品、仪器设备的体积和重量成倍或几十倍地减少，而这类设备中不可缺少的电源系统中磁性器件过大的体积和重量就成为越来越突出的矛盾。因此研究高效节能、小型化的电源系统是当前电源技术中最活跃的发展方向。20 世纪 70 年代以来，国外采用大幅度提高工作频率的方法取得了进展，这就是采用无工频变压器的高频开关电源，它具有效率高，体积小，重量轻，调整范围宽，使用灵活等突出优点，因此被称之为“电源技术革命”。变压器铁心材料的体积重量（W）与工作频率（f）有如下关系：

$$W \propto \frac{P_0}{B_m f \eta}$$

式中：P_0 为输出功率；B_m 为工作磁感；η 为变压器效率。

由该式可知，当其他条件不变时，频率越高，铁心的体积重量越小。开关电源自 20 世纪 70 年代诞生以来其工作频率已由 20 世纪 70 年代 20～100kHz、80 年代 100～500kHz、变化为 90 年代 500～1000kHz 以上。

在高频下应用的高导磁合金，铁心的损耗必须很小。为此，应选用高电阻率材料，细化磁畴结构，采用最佳的带厚，合适的 μ_i 和 B_m 值等。同时，其热处理有如下特点：

（1）退火温度应低于直流或低频下应用的温度。

（2）退火温度和冷却速度对高频磁性能影响相对较小。

（3）由于工作频率高，钢带薄，退火时的气氛要纯净，绝缘涂层的质量要好。

（4）为获得更细的晶粒，可以采用快速升温的方法。

表 2.3-85 为某些高磁导率合金的高频性能。超薄带小磁芯大量用于通信、电话、计算机等的开关和存储元件，还可用于测控系统的失真扼流圈和磁放大器等。

表 2.3-86 列出一些典型合金超薄带的性能（与铁氧体对比）。表 2.3-87 列出厚度对 1J79、1J77 磁性的影响。

超薄带的磁性不仅与合金成分、带厚有关，而且还与制造工艺特别是涂层质量、热处理工艺有关。由于钢带很薄，每一工艺环节都必须不沾污钢带，如退火气氛、绝缘涂层质量等。

4.2 铁钴系合金

铁钴合金的相图示于图 2.3-29。由于铁和钴在周期表中的位置相邻，原子直径接近，因此在固相线下，920℃以上相当宽的成分范围内形成连续的 γ-固溶体，但是在很宽的钴含量范围内（0～75%）发生 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相转变，相转变温度最高为 986℃。

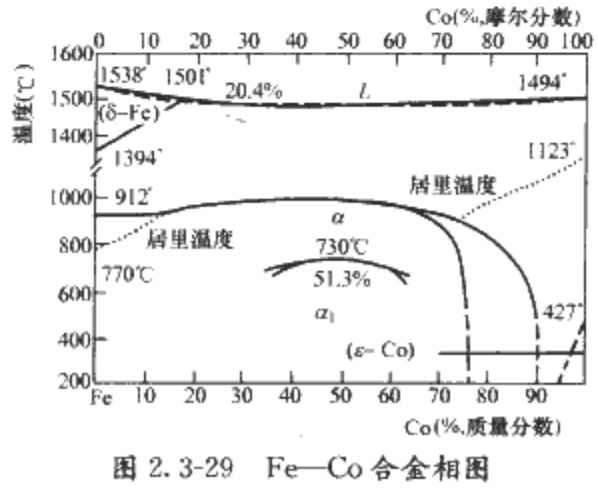


图 2.3-29 Fe—Co 合金相图

表 2.3-85 80Ni—Fe 合金的高频损耗特性

材 料	厚度 (mm)	铁损 (W/kg)			B_{800} (T)
		$P_{0.2/20k}$	$P_{0.5/10k}$	$P_{0.5/20k}$	
Ni72～83+CrMoCu	0.03 0.015	7～8 3～4	17 10	50 15	0.78
Ni79Mo4 (1J79)	0.02	—	15	—	0.75
Ni83V4	0.02	—	9.5	—	0.64
Ni80Mo4.3Cr0.6	0.02	4～6	8.7	23～27	0.66
Ni81Mo6 (1J86)	0.02	7～8	8～10	20～28	0.68
Ni80Nb8 (1J88)	0.02	2～3	7～9	23～30	0.65
Ni79～81+MoCrNb(1J851)	0.02	<6	<10	<30	0.66

表 2.3-86 厚 0.003mm 软磁合金的磁性能

合金	H_c (A/m)	B_r (T)	B_r/B_s	开关系数 S_w
1J51	28～32	1.40	0.90～0.91	1.0～1.1
1J65	20～24	1.25	0.95～0.96	1.1～1.2
1J67	16～20	1.20	0.94～0.95	1.0～1.1
1J34	40～48	1.10	0.95～0.96	1.2
1J85	3.6～4.8	0.65	0.88～0.90	0.35
1J79	6.4～7.2	0.60	0.90～0.91	0.35
1J77	4.8～5.6	0.55	0.91～0.92	0.30
铁氧体	12	0.205	0.94	0.50

表 2.3-87 钢带厚度对磁性能的影响

合金牌号	0.003mm			0.001 5mm			0.001mm		
	H_c (A/m)	B_r/B_s	S_w	H_c (A/m)	B_r/B_s	S_w	H_c (A/m)	B_r/B_s	S_w
1J79	7.2	0.90	0.35	12.0	0.92	0.31	14.4	0.93	0.30
1J77	5.6	0.91	0.30	9.6	0.93	0.29	11.2	0.94	0.29

钴含量在 40%～60%范围内，退火后发生有序—无序转变，产生 FeCo 有序相（图 2.3-30 中 α_1 相），最高转变温度为 730℃。这种转变和其他具有有序—无序转变的合金一样，性能将发生显著变化。

铁钴合金的磁性与 Fe—Ni 系坡莫合金一样，取决于合金的 K_1 和 λ 值。图 2.3-30～图 2.3-33 为铁钴合金的钴含量与 K_1、λ、磁化强度 J、磁导率的关系。由此可见 FeCo 合金有如下特点：

（1）在所有软磁材料中 FeCo 合金的 T_c 和常温下的 J_s 最高，如 Co50Fe 的 T_c=980℃，在甚强磁场下，Co35Fe 的 J_s 最高（2.45T），在弱磁场下 Co50Fe 的 J_s 最高。

（2）在 Co50Fe 附近 μ_i 和 μ_m 最高，软磁性最佳。

（3）有序化对 K_1 和 λ_s 值有重大影响，淬火无序态的 $Co_{42}Fe$ 合金的 $K_1 \rightarrow 0$，退火慢冷有序态的 Co50Fe 的 $K_1 \rightarrow 0$，在 50%～60%Co 处可有最高的 λ_s 值（77×10^{-6}）。

由于 FeCo 合金的 J_s 高，并有较好的软磁性，故有其特殊用途。主要是用做机载电子设备中的变压器、电动机，电话机中膜片，高速打印机中嵌铁，接收机中线圈、开关和存

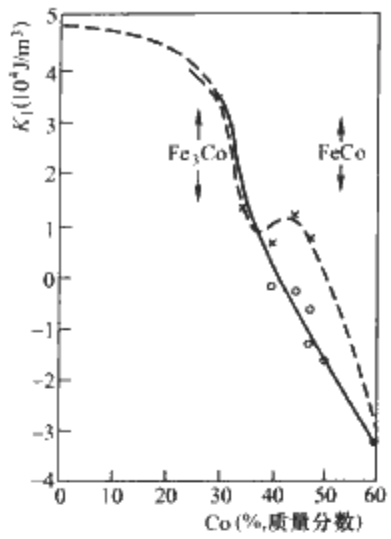


图 2.3-30 Fe—Co 合金的磁各向异性常数

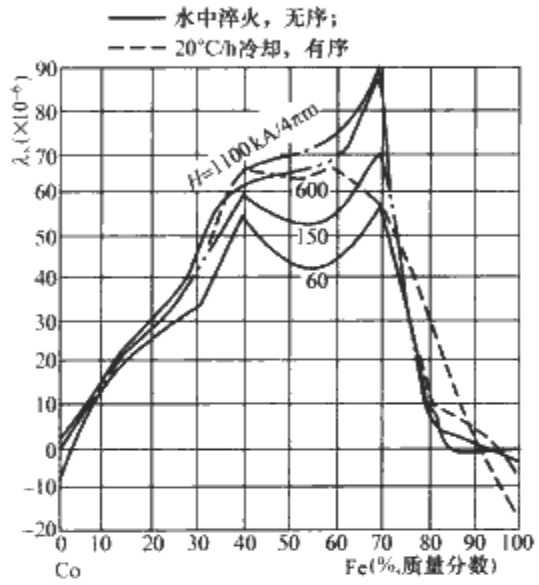


图 2.3-31 Fe—Co 合金的磁致伸缩

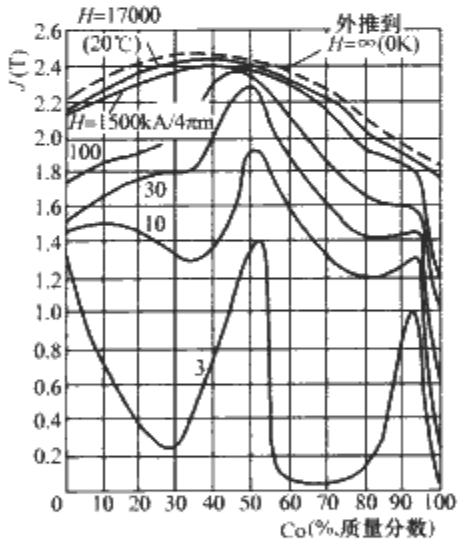


图 2.3-32 Fe—Co 合金（退火）在不同场强下的磁化强度

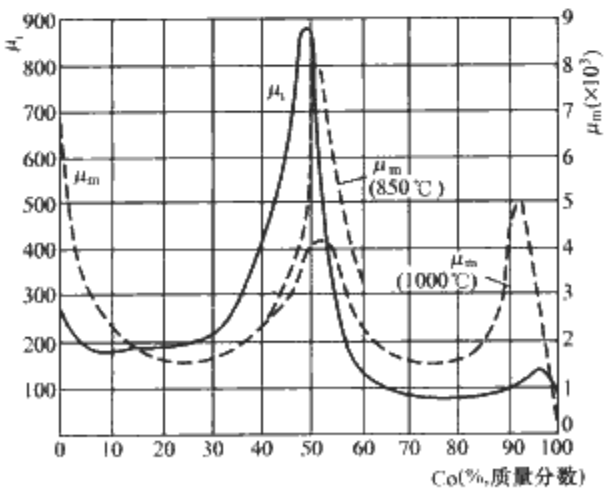


图 2.3-33 Fe—Co 合金的起始磁导率和最大磁导率

储铁心等。由于 T_c 高，又可做高温磁性元件，如宇航核动力系统中的发电机铁心，电器设备和控制元件等。但是这个合金的致命缺点是电阻率（ρ）低，并且由于 Co 含量较高，价格昂贵。另外虽然 Co50Fe 合金慢冷使 $K_1 \to 0$ 得到好的软磁特性，但慢冷又使合金有序化，造成很大的脆性，不易冷加工成型，添加 V、Cr、Nb、Ni 等元素可改善脆性，增加 ρ。

基于磁性和机械性能的不同，常用的 FeCo 系合金大致可分为三类：Co27Fe，Co35Fe 和 Co50Fe 合金。

Co27Fe 合金的特点是退火后的塑性比 Co35 和 Co50 合金好，易于轧制加工。尽管 Co 含量低些，但 J_s 仍很高，适宜做电机转子和定子及其他在机械负荷条件和高温（900℃以下）工作的磁导体。添加少量的铬可改善合金的电磁性能和机械性能。这种合金的国外牌号有 Hiperco27（Co27Cr0.3～2Fe），27KX（Co26.5～28Cr0.5Fe）等。国内尚无这类合金的国家标准。

Co35Fe 合金具有最高的 J_s，适宜做电机磁路材料及电磁铁的极靴等，国外牌号有 Hiperco35。国内已研制了这类合金，但尚无国家标准。

工业上用途最广的是 Co50Fe 型合金，它的 J_s、T_c 都很高，但很脆，难以加工。国外牌号为 Permendur 合金，国内牌号为 1J20。在 Co50Fe 中加 2%V 可改善这个合金的加工性，提高电阻率及磁性。国外牌号为 2V-Permendur 合金，我国国家标准中定名为 1J22 合金。这个合金在慢冷以后 $K_1 \to 0$，因此可以利用磁场热处理，使 K_u 远远大于 K_1 产生 H_c 较小的矩形回线，国外牌号为 Supermendur，国内非正式牌号为 1J22（超）。

表 2.3-88 是国标 GB/T 15002—1994 规定的 1J22 合金磁性能，表 2.3-89 为国外 FeCo 系合金的磁性能。

表 2.3-88 我国铁钴矾合金的磁性（GB/T 15002—1994）

牌号	主要化学成分	B_{400} (T) ≥	B_{800} (T) ≥	B_{1600} (T) ≥	B_{2400} (T) ≥	B_{4000} (T) ≥	B_{8000} (T) ≥	H_c (A/m) ≤	成品种类
1J22	Co49～51 V0.8～1.8	1.60	1.80	2.00	2.10	2.15	2.20	128	冷轧带材
		—	—	—	2.05	2.15	2.20	144	丝材锻材

表 2.3-89 国外工业用 Fe—Co 合金的典型性能

国内外牌号	主要成分（质量分数）	μ_1	μ_m	H_c (A/m)	B_s (T)	ρ ($\mu\Omega$/cm)	T_c (℃)
Hiperco27	Co27Cr0.6		2800	200	2.36	20	940
Hiperco35	Co35Cr1.5	650	10 000	80	2.42	40	
Permendur (1J20)	Co50	800	5000	160	2.40	7	
2V-Permendur (1J22 · Hiperco50)	Co50V2	1250	11 000	64	2.36	25	980
Supermendur [1J22（超）]	Co50V2（磁场处理）	80～1000	9000～70 000	16～18.4	2.36	25	980
	Co34.8Nb0.25			150	2.45		
	Co51.4Nb0.32			102	2.44		
K-MP11	Co50V1		12 000	45	2.35	26	
K-MP13	Co50V2.2		9800	57	2.32	39	
K-MP15	Co50V3		3500	164	2.05	50	

$2VCo_{50}Fe$ 合金冷轧板在 695℃退火，使之发生局部再结晶，可以获得高强度和高韧性。在铁钴合金中加入适量的 Nb、Ta、Ni 等元素，可以获得磁性能高与力学性能优良的配合。

Fe—Co 系合金的电阻率较低，最大为 $40\times10^{-8}\Omega\cdot m$，且不易获得 0.05mm 厚以下的薄带，故在高频应用时，涡流损耗大，只宜在直流或低频条件下使用。由于它的饱和磁化强度和在较大磁场下的磁导率高，适于在强信号、大功率、大扭矩输出及小型化、轻量化的电器中应用。此外，它还是一种很好的磁致伸缩材料（λ_s 达 70×10^{-6}）。

4.3 铁铝系合金

铁铝系合金与硅钢一样也是较早研究的软磁材料，它的主要优点是：

（1）选择合适的铝含量，可以获得各种较好的软磁特性。如 16%铝合金有较高的磁导率；12%铝合金既有较高磁导率，又有较高的饱和磁感应强度；13%铝合金可以具有较高的 λ_s。

（2）有较高的电阻率。如 12%铝合金的 $\rho=100\mu\Omega\cdot cm$；16%铝合金的 $\rho=150\mu\Omega\cdot cm$；因此具有较好的高频磁特性。

（3）有较高的强度和硬度。12%铝合金的 $\sigma_b\geqslant70kg/mm^2$；16%铝合金的 $H_v=230\sim250$。因此适宜做磁头材料。

（4）不含镍、钴等贵重元素，原料资源丰富，价格低廉。

（5）密度小。

（6）对应力敏感性小，适宜在冲击、振动等环境下工作，此外还有极好的抗核辐照性能。

由于有以上优点，铁铝合金可以部分取代铁镍系坡莫合金，在电子变压器、磁头以及磁致伸缩换能器等处使用。但是铁铝合金也存在下列严重问题：

（1）与铁镍坡莫合金相比，铁铝合金的磁性能还不算高，工艺也不够成熟，使生产出来的材料性能波动大，要稳定地获得高的磁性能比较困难。

（2）铝含量较高时，合金塑性下降，变脆，难以进行冷加工，只能进行中温轧制，使加工设备复杂化，难于获得较薄的材料。现在最薄仅为 0.1mm。由于硬脆也使冲制零件时模具损伤大，工效低，成本增加。这些都限制了它的推广应用。

Fe—Al 合金的相图如图 2.3-34 所示。在含铝量为 0～33%（质量分数）[52%（摩尔分数）] 范围内都是铝溶于铁中的 α 固溶体，为体心立方结构。合金中主要存在两种有序结构，即 Fe_3Al 和 FeAl（铝的质量分数分别为 13.9 和 32.6）。当铝含量约小于 9.6%（质量分数）[18%（摩尔分数）] 时，未发现有序—无序转变。当铝含量高于 9.6%（质量分数）时，则合金的物理性能随热处理冷却速度有明显变化，说明其中的有序状态不同。当合金成分不正好和 Fe_3Al、FeAl 对应时，形成不完全的有序结构。Fe_3Al 的有序转变温度约为 530℃。

含铝在 16%（质量分数）以内的 Fe—Al 合金的密度和电阻率如图 2.3-35 所示。合金的电阻率随铝含量的增加而明显增大。在含铝量较高的合金中，退火状态的合金的电阻率明显下降是由于 Fe_3Al 有序化造成。合金的饱和磁感应强度、各向异性常数和磁致伸缩系数如图 2.3-36（a）、（b）和（c）所示。这些图都表明合金的磁性与其中的有序变化明显有关。对于有序状态，在 12%（质量分数）Al 附近 K_1 为零；在无序状态，16%（质量分数）Al 附近 K_1 和 λ_{100} 同时趋近于较小的值；而在 10%～14%（质量分数）Al 的成分区，可以获得很大的磁致伸缩。和 Fe—Ni 合金相似，对 Fe-Al 合金磁场热处理也是有效的。图 2.3-37（Ⅰ）示出在低铝成分范围内，磁场退火对磁导率的影响，可以看出效果是很明显的［特别是 10%（质量分数）Al 处］。在高铝成分区，磁场退火效应不明显，这是因为 Fe_3Al 有序形成能力太强，而对方向有序的形成有遏止作用。在 16%（质量分数）Al 处 μ_i 和 μ_m 达峰值（见图 2.3-37Ⅱ）。

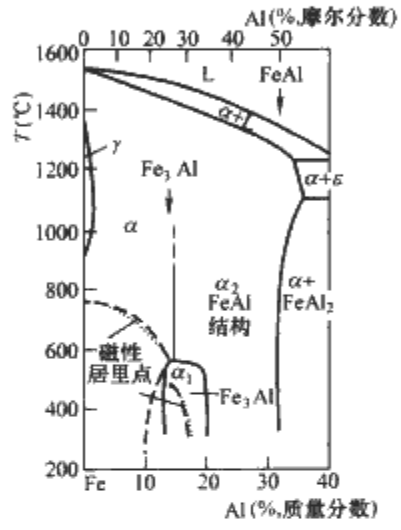


图 2.3-34 Fe—Al 合金的相图

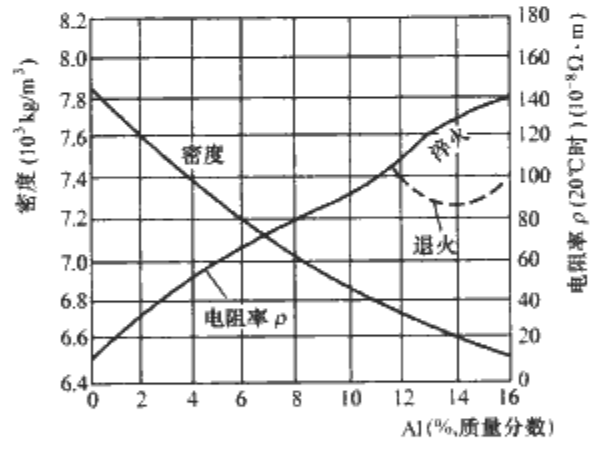


图 2.3-35 Fe—Al 合金的密度和电阻率

列入我国国标 GB/T 15004—1994 的铁铝合金有 4 种，其性能见表 2.3-90，表 2.3-91 为国外高导磁 FeAl 合金的磁性水平。

表 2.3-90-1 我国标准列出的铁铝系软磁合金的牌号和性能（GB/T 15004—1994）

合金牌号	产品种类	厚度 (mm)	磁导率 $\mu_{0.4}$ $\mu_{0.8}$ μ_{max} ≥	饱和磁致伸缩系数 λ_s	磁感应强度 $B_{24\,000}$ $B_{32\,000}$ ≥ (T)	矫顽力 H_c ≤ (A/m)	剩余磁感 B_r ≤ (T)
1J12 (Al12Fe)	温轧带材	0.20～1.00	— 2480 25 000	—	1.20 1.30	12	0.5
1J13 (Al13Fe)		0.20～1.00	— — —	35×10^{-6}	— —	—	
1J16 (Al16Fe)		0.20～0.35	4000 50 000	—	0.65	3.2	0.4
		0.35～1.00	6000 30 000		0.65	3.2	0.4

表 2.3-90-2

合金牌号	产品种类	厚度或直径 (mm)	磁感应强度 B_{500} ≥ (T)	B_{1000} ≥ (T)	B_{2500} ≥ (T)	矫顽力 H_c ≤ (A/m)	铁损 $P_{0.75/400}$ ≤ (W/kg)	$P_{1.0/400}$ ≤ (W/kg)
1J6 (Al6Fe)	冷轧带材热轧（锻）棒材	0.10～0.50	1.15	1.25	1.35	48	12	21
		3～100	1.10	1.15	1.30	64	—	—

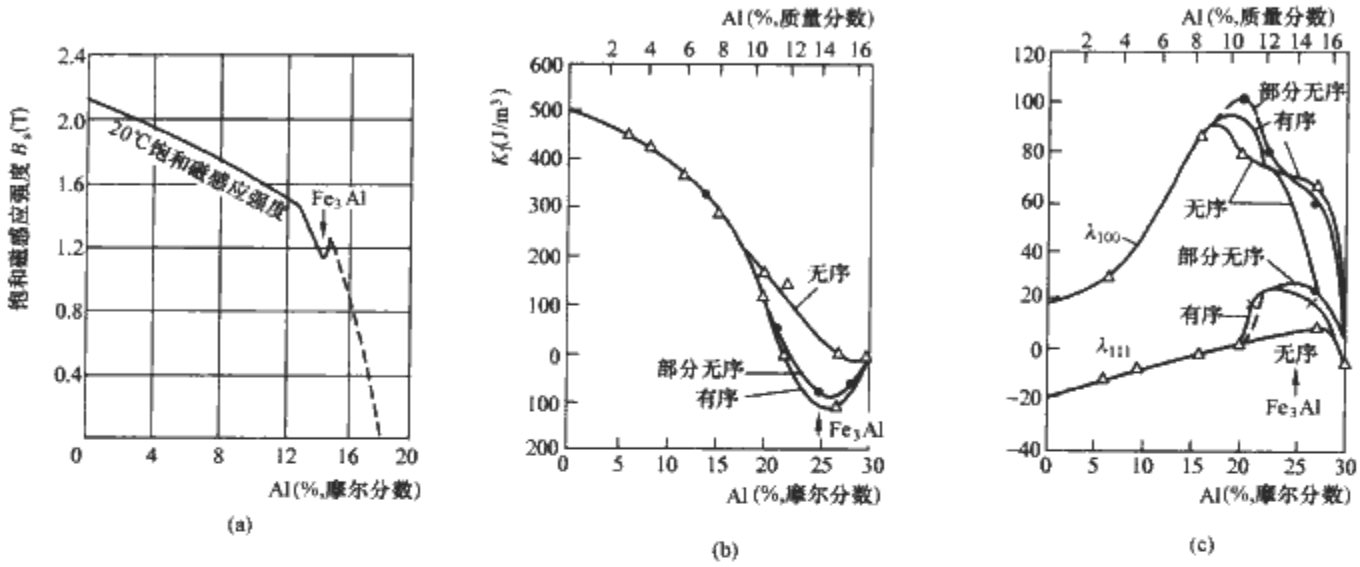


图 2.3-36 合金的饱和磁感应强度，各向异性常数和磁致伸缩系数

(a) Fe—Al 合金的饱和磁感应强度；(b) 磁晶各向异性常数；(c) 磁致伸缩系数

× 炉冷；• 冷却室中冷却；△ 水冷

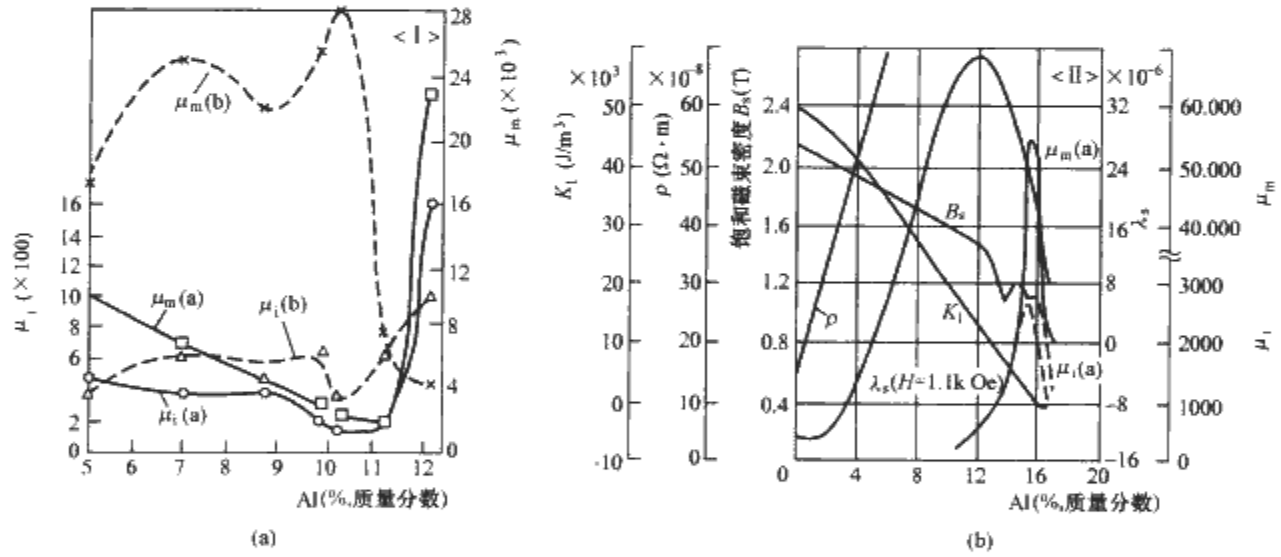


图 2.3-37 热处理对 Fe—Al 合金磁导率的影响

(a) 无磁场退火；(b) 磁场退火

Ⅰ—5%～12%Al；Ⅱ—12%～17%Al（1Oe=10^3A/4πm=kA/4πm）

表 2.3-91 国外高磁性能的铁铝系

牌 号	国别	主要成分 [余为 Fe，(%，质量分数)]	μ_i	μ_m	B_s (T)	H_c (A/m)	$\rho\times10^{-8}$ (Ω·cm)	T_c (℃)
Alperm	日本	Al16	8500	100 000	0.78	0.8	140	400
Alperm		Al16	3450	116 000	0.78	2.0	—	—
Fe-Al-Mo		Al14.6Mo3.07	8000	120 000	0.69	1.6	—	—
Fe-Al-Mo		Al15Mo3	6000	110 000	0.65	2.4	—	—
Fe-Al3		Al3.5	500	19 000	1.51	24	47	
Ferroperm		Al1	—	66 500		12.8	—	—
16-Alfenol	美国	Al15.9	2778～6000	60 000～115 000	0.76～0.80	1.9～3.2	140	400
12-Alfenol		Al11.7	4530	45 560	1.44	4.5	100	655
Themenol		Al15.6Mo3.3	6390	145 000	0.69	1.4	160	—

续表

牌 号	国别	主要成分 [余为 Fe，(%，质量分数)]	μ_i	μ_m	B_s (T)	H_c (A/m)	$\rho\times10^{-8}$ (Ω·cm)	T_c (℃)
Ю12	俄罗斯	Al12	6350	150 000	1.45	2.4	—	—
Ю12К		Al12Co2	9200	142 000	1.44	2.16	—	—
16ЮНХ		Al16Cr2.1～2.5	10 000～25 000	60 000～100 000	0.65	0.8～2.4	150	260
Ю14М		Al14.4Mo1.97	12 200	124 500	—	1.76	—	—
Ю14Г3		Al14Mn3	5500	82 000	—	1.9	—	—
Vacodur16	德国	Al16	8000	—	0.90	4.0	—	—
1J6	中国	A16		3000～6000	1.35	32～48	68	730
1J8①		A18	513	3461	1.34	44	81	690

① 低 B_r 合金，B_r～0.32T。

4.4 耐蚀软磁合金

随着机电一体化技术的发展，自动监控技术和远距离操作技术等在各个产业部门的应用日益增多，特别是汽车用电子燃料喷射装置以及在致动器上利用电磁力的机器发展很快。在这些机器上都要使用高磁导率、低矫顽力的磁心，而且这些磁心由于使用环境的苛刻还要求具有良好的耐蚀性、可切削性及焊接性。因此，电磁不锈钢的开发日益受到广泛的重视。

耐蚀软磁合金是能耐某种介质腐蚀的软磁材料，又称不锈软磁合金。主要用于制作在湿热、盐雾、氨气或各种酸、海水、污水等腐蚀性介质中工作的电磁元件的铁心，也可用于磁屏蔽等。

常用的不锈软磁合金有三类：含铬（Cr）13%～17%的铁铬系合金；含镍（Ni）36%～50%的铁镍系合金及含铝（Al）4%～8%的铁铝系合金等。

Fe—Cr 系合金作为耐蚀和抗氧化的材料已在工业中广泛应用。铬的加入提高了合金的电极电位，同时在表面形成致密的防护层—钝化膜，大大提高了耐蚀性。铁和铬形成体心立方晶格的连续置换固溶体，其软磁性能大约在 16%～17%Cr 处最好。由于磁晶各向异性常数 K_1 较大（约 2×10^4 J/m³），磁致伸缩系数 λ_s 也大（约 26×10^{-6}），故其磁导率较低，矫顽力（H_c）较高。但由于其价格便宜，B_s 值较高，耐蚀性好，电阻率（ρ）高，磁性的温度稳定性好等，使之成为目前应用最广的耐蚀软磁材料。主要用在潮湿、盐雾或其他腐蚀性介质中工作的电磁阀材料等。

图 2.3-38 为 Fe—Cr 系相图，Fe 和 Cr 形成体心立方的 α 相，在 0～13%Cr 范围内有 γ⇔α 相转变，最低相变温度为含 Cr7.5%（摩尔分数）[7%（质量分数）] 处的 830℃。γ-相为非磁性相，它的成分范围受 C、N 不纯物以及 Ni 等易生成 γ-相元素的影响。Fe—Cr 系软磁合金的 Cr 含量一般不超过 20%。在 Cr 含量不大于 20%（摩尔分数）的合金中不发生有序—无序转变，但高 Cr 钢的粗晶倾向严重，韧性差，冷加工性和焊接性能也不理想。

图 2.3-39 为铬含量对 B_{2000}（$H=2000$A/m）、电阻率（ρ）和矫顽力（H_c）的影响。常用的 Cr—Fe 合金基本上分两组，一是 10%～13%Cr—Fe 合金，一是 16%～18%Cr—Fe合金，前者的 B_{20} 较高，后得的 H_c 较低，铬含量低于 10%时 H_c 增大。前者的 T_c～750℃，后者的 T_c～700℃。

合金的磁性除与铬含量有关外，还与（C+N）含量有关（见图 2.3-40）。现在大生产中已可使(C+N)<0.02%，Cr13—Fe 合金的 H_c 与优质纯铁相当。图 2.3-41 为各种添

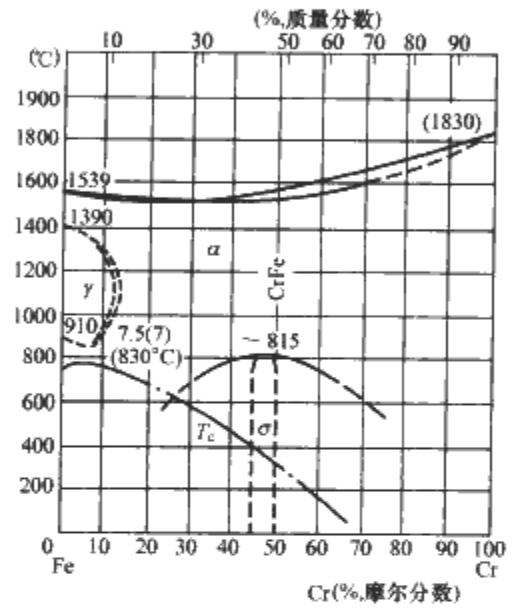


图 2.3-38 Cr—Fe 合金相图

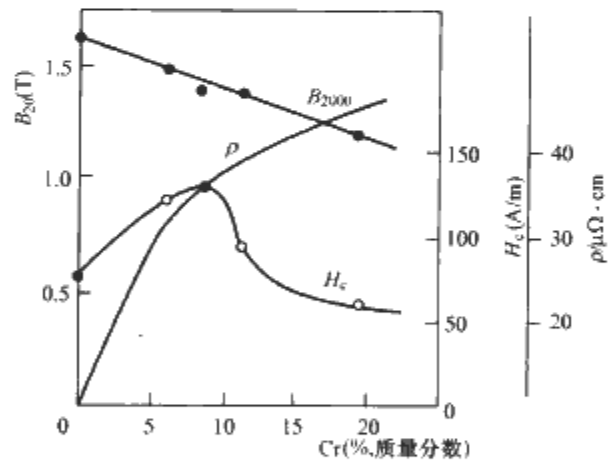


图 2.3-39 铬含量对矫顽力（H_c）和磁感应强度（B_{20}）的影响

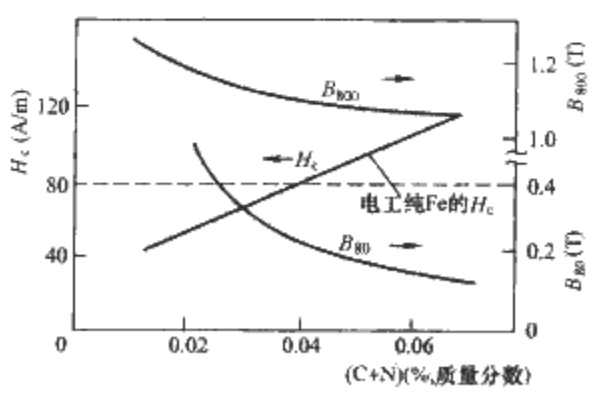


图 2.3-40 (C+N) 含量对 Cr13Fe 合金磁性影响

加元素对 Cr13—Fe 合金 H_c 的影响。Ti、Si、Al、Mo 都使 H_c 下降。加入大量 Si 会损害钢的加工性，故一般（Si+Al）的添加量限制在 3%以下。此外 Ti 的改善磁性的作用比 Si、Al 更大，加 Ti 和 Al 比加 Si 更有效地提高冷加工塑性，因此可用 FeCrAl（Ti）系来代 FeCrSi 系耐蚀软磁合金。

为了改善切削和钻孔等加工性，开发了加铅的和加硫的易切削型电磁不锈钢。加铅易切削不锈钢由于铅在钢中呈微细分散状态故对其磁性和耐蚀性不会产生有害影响，而切削性却大为改善。加硫易切削不锈钢则需同时添加 Ti、Zr 等，否则会损害钢的磁性和耐蚀性。为了改善电磁不锈钢的耐蚀性，添加少量 Ti、Al、Mo 和 Si（见图 2.3-42），另外加 Ni、Cu 都是有效的。

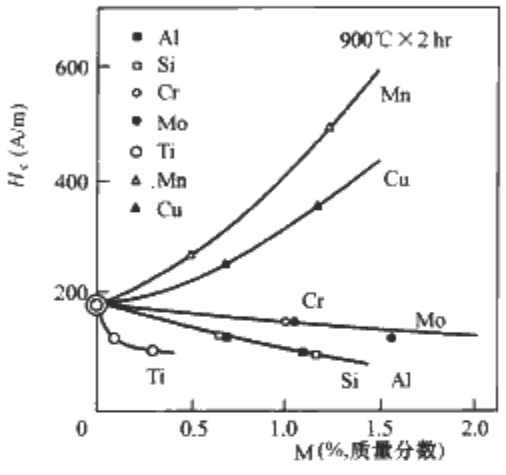


图 2.3-41 添加元素（M=Mn、Cu、Mo、Ti、Al、Si）对 Cr12—Fe 合金矫顽力（H_c）的影响

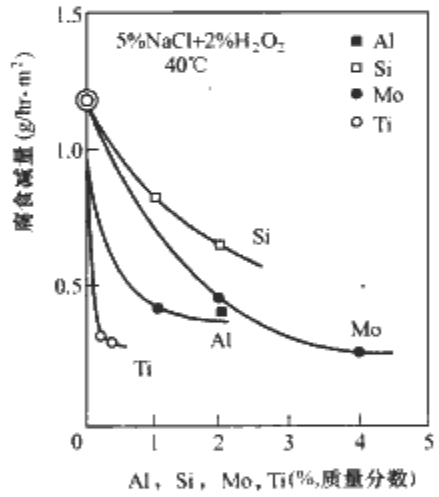


图 2.3-42 添加元素（M=Mo、Ti、Al、Si）对 Cr17—Fe 合金耐蚀性的影响

最近的研究发现含 Pb 的易切钢对环境污染，管理麻烦。而含 S 的易切钢，由于形成 S 化物，不仅损害耐蚀性且易成为裂纹的起点，使冷塑性加工困难。如果在 FeCr 系软磁不锈钢中加适量 Ti、C、S 三元素，由于它们在钢中形成稳定而均匀断续分布的微细 TiCS 析出物，不仅消除了 C、S 的有害影响，且使冷锻加工或切削加工性明显改善，刀具磨损量显著减少，这对制造电磁阀、燃料喷射装置和磁传感器等应用十分有利。

表 2.3-92 铁铬、铁镍系耐蚀合金的磁性能（GB/T 149—1994）

牌号	在不同磁场强度（A/m）下的磁感应强度（T）					矫顽力 H_c (A/m)
	B_{2400}	$B_{r/240}$	$B_{r/800}$	B_{3200}	$B_{r/3200}$	
	不小于	不大于	不小于		不大于	不大于
1J36 (Ni36Fe)	0.8	0.3	—	1.2	0.35	16
1J116 (Cr16Fe)	1.0	—	1.1	1.3	—	80
1J117 (Cr17Ni0.6 Ti0.5)	0.9	—	1.0	1.25	—	80

表 2.3-92 列出了国标 GB/T 149—1994 中 Fe—Cr 和 Fe—Ni 系合金的磁性能。目前国内的性能水平为：1J116 合金，μ_m 可达 12000，H_c 为 25A/m；1J117 合金，μ_m 可达 9000，H_c 为 30A/m。表 2.3-93 列出了日本六家公司的 Fe—Cr系耐蚀合金的磁性能。

Cr—Fe 系合金由于在低温下不发生有序—无序转变，故最终退火工艺较为简单。一般不要超过 900℃，即不要超过 $\alpha \Leftrightarrow \gamma$ 同素异晶转变温度，纯铁为 912℃，铬的加入使其有所变化，图 2.3-43 示出 γ 相区与铬和（C+N）含量的关系，此图为退火温度选择的依据。

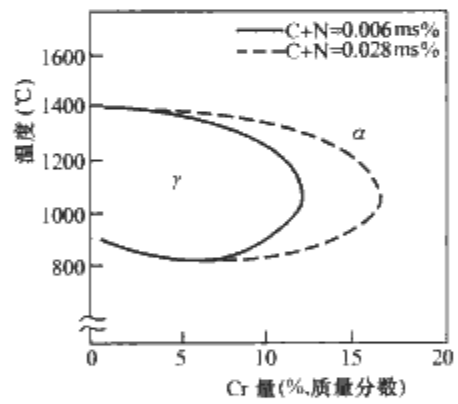


图 2.3-43 Fe—Cr 合金的 r 相区

表 2.3-93 日本各公司生产的耐蚀合金的磁性能

分 类	生产企业	商品名	成 分（%，质量分数）	H_c ($\frac{10^3}{4\pi}$A/m)	B_{800} (T)	ρ ($\mu\Omega \cdot cm$)
13Cr 系	东北特殊钢	KM25	7Cr2SiAlTiPb	1.0	1.28	38
		KM31	13Cr2Si	1.0	1.13	92
		KM35F	13Cr1SiAlPb	1.1	1.20	72
		KM36	13Cr0.4AlSi	1.3	1.19	60
		KM40	13Cr0.3Al0.1SiMoTi	1.0	1.24	65
		KM70	13Cr2AlSi	0.3	1.16	97
13Cr 系	大同特殊钢	MERIF	13.5Cr0.9Si0.25AlPb	≤1.3	$B_{400} \geqslant 1.0$	68
	日新制钢	FNSS.MAG2	13Cr1Si	1.1	1.26	—
	山阳特殊制钢	QMR1L	7Cr2.0Al0.6SiPb	1.4	1.31	85
		QMR2L	10Cr1.2AlPb	0.9	1.29	80
		QMR3L	13Cr1.0Al0.3SiPb	0.9	1.15	80
		QMR4	13Cr1.0Si1.0Al	0.9	1.12	88
	住友金属工业	NAR.SN9	11Cr2Si	1.5	1.10	—
	爱知制钢	AUM10	12.5Cr2Si	1.0	1.20	92
		AUM15	12Cr0.7Si0.4AlPb	1.0	1.13	72
		AUM15H	12Cr0.3AlPb	1.0	1.22	60
		AUM25	10Cr3AlPb	1.0	1.17	100

续表

分 类	生产企业	商品名	成 分（%，质量分数）	H_c（$\frac{10^3}{4\pi}$A/m）	B_{800}（T）	ρ（μΩ·cm）
17Cr 系	东北特殊钢	KM37F	17Cr1SiAlPb	1.1	1.18	75
		KM38	18Cr2Si2Mo	1.0	1.03	85
		KM65	18Cr0.3Al0.1Si	1.0	1.14	61
	大同特殊钢	MER2F	17.5Cr0.9Si0.25AlPb	≤1.5	B_{400}≥1.00	72
	山阳特殊制钢	QMR5L	15Cr1.5Si1.0AlMoPb	1.2	1.10	99
	爱知制钢	AUM14	17Cr1.3SiPb	1.0	1.17	75
		AUM14H	17CrTi	1.0	1.18	52
		AUM20	19Cr2MoTi	1.0	1.15	53

图 2.3-44 为退火温度（T_a）对 Cr13Al0.7 合金不同频率的振幅磁导率（$\hat{\mu}_a$）的影响。在较小的励磁场下（H_m=80A/m）的 $\hat{\mu}_a$（图 a）（差不多在磁化曲线的膝部—即 μ_m 处）：随着 T_a 的提高，0～1kHz 的磁导率也增加，而 10～100kHz 的 $\hat{\mu}_a$ 则出现峰值，峰值所对应的 T_a 随着频率（f）的提高而下降。显然 T_a 的影响是与晶粒尺寸有关，晶粒越大，高 f 下的 $\hat{\mu}_a$ 下降。在较大的励磁场下（H_m=240A/m）的 $\hat{\mu}_a$（在磁化曲线膝部以上接近饱和），随着 T_a 的上升，直流和 1KHz 下的磁导率几乎不变，而 10～100kHz 时的 $\hat{\mu}_a$ 值下降。总的看，T_a 的变化对直流或低频磁性影响大，而对高频磁导率影响小。

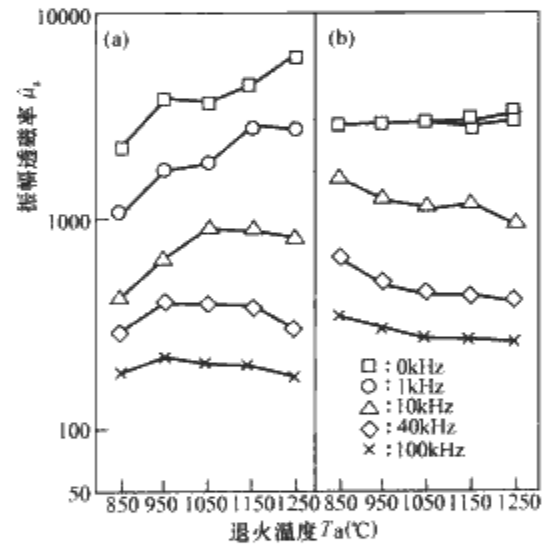


图 2.3-44 退火温度（T_a）对 Cr13Al0.7 合金不同频率振幅磁导率 $\hat{\mu}_a$ 的影响

（a）H_m=80A/m；（b）H_m=240A/m

图 2.3-45 为超低 C 的 00Cr13Fe 合金的损耗曲线。

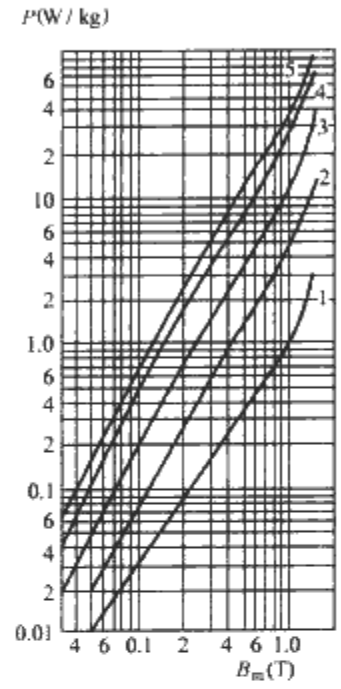


图 2.3-45 在不同频率下 00Cr13 合金（厚度 0.15mm）的比损耗 P 与磁感的关系

1—50Hz；2—200Hz；3—400Hz；4—600Hz；5—1000Hz

图 2.3-46 为退火温度（T_a）对 Cr17Fe 合金磁性影响。随着 Ta 的提高 μ_m 增加，H_c 下降，B 值则视 H 值的大小而有不同表现（图中 B_{80}、B_{400}、B_{1000}、B_{8000} 的 H 分别为 6369、31847、79618、636943A/m）。

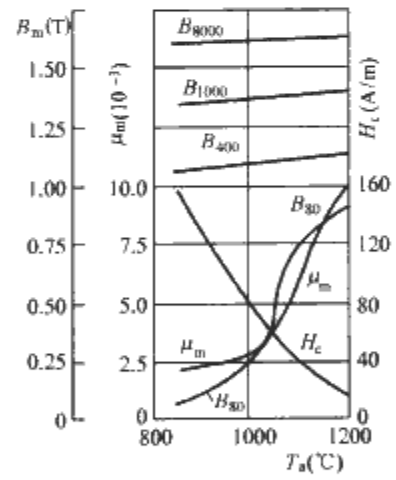


图 2.3-46 Cr17Fe 合金（厚度 0.5mm）的磁性能与热处理温度的关系

为了经济实用，采用 Fe—Al 合金也可得到有一定耐蚀性的材料，这样可节省大量的 Ni 和 Cr 等稀缺金属。如果在 Fe—Al 合金中再加入少量的 Cr（约 4%左右），抗蚀性就更好一些。能进行冷加工的耐蚀 Fe—Al 合金在氢气保护下，在 1200℃保温 4 小时，以 100℃/h 冷却至 480℃，然后快冷，得到较好的磁性和耐蚀性，见表 2.3-94。

表 2.3-94 Fe—Al 合金的磁性及耐蚀性

成分（%，质量分数）	μ_m	H_c（$\frac{10^3}{4\pi}$A/m）	B_{80}（10^{-4}T）	B_{240}（10^{-4}T）	B_r（10^{-4}T）	腐蚀结果（海水、盐雾）
Al4Cr4	13 700	0.3	10 100	12 400	10 200	无
Al5Cr4	12 400	0.27	9200	11 900	8900	无
Al6Cr4	11 400	0.22	8650	11 700	6900	无
Al7Cr4	7900	0.26	6900	10 600	5100	无
Al8Cr4	7030	0.27	6300	10 200	4200	无

由表 2.3-94 可以看出，随 Al 含量的增加，μ_m、B、B_r 均有下降，但 B_r 下降的幅度更大。Fe—Al 合金还有个突出的优点，即磁性的温度稳定性较好。其磁性如 Al_8Cr_4 的 B_{240} 和 B_r 在室温致 200℃几乎不变。

在某些条件下，除了要求合金有较好的抗蚀性能外，还要求有比较高的磁性能，那么可以采用Fe—Ni系合金（见表2.3-95），使Ni含量在35%～50%左右，再加入适量的Cr、Cu，但是成本很高，作少量特殊之用是可行的。Fe—Ni系合金适合在氧化介质或胂类介质中应用，也可用于对磁性要求较高的海水、盐雾和湿热气氛中使用。

4.5 软磁合金的供货方式及铁心系列

各类软磁合金可以半成品和经热处理的各类铁心元件供应。

半成品包括冷轧带、冷拉丝、冷拔管、热轧（锻）扁材和棒材等，它们的尺寸规格见表2.3-96～表2.3-100。外观及表面质量等要求可查阅国标BG/T 15001—1994“软磁合金尺寸、外形、表面质量、试验方法和检验规则的一般规定”。

各种形状的半成品在制成元件后须进行最终热处理，以获得所需要的磁性能。经热处理的铁芯元件包括带绕环形铁心、卷绕切割铁心、叠片铁心、粘结叠片EK铁心、屏蔽罩等。

表2.3-95 耐蚀Fe—Ni系合金性能

成分和性能 / 牌号	合金成分其余为Fe（%，质量分数）	μ_i	μ_m	H_c (A/m)	B_{80} (T)	B_s (T)	ρ ($10^{-6}\Omega\cdot$cm)	HV
1J36	Ni36	2000	22 000	0.66	0.78	1.20	85	130
1J37-NSI38-8	Ni38Cr8	14 800	125 000	1.36	—	0.75	96	130
PB-X	Ni45Cu	18 000	97 600	3.36	—	1.50	74	132
Cronimax BCRB	Ni45Cr11Si1.7	18 000	—	1.4	—	0.5	120	—
Cronimax DCRD	Ni32Cr10Cu3.5	8000	25 000	4	—	0.4	100	—
	Ni46Mo2Cu3	—	93 000	0.40	1.20	1.40	67	135
	Ni40Co15	—	12 500	31.2	1.02	1.26	—	—
	Ni49Cu1.5		58 400	4.64	1.49	1.57	—	—

表2.3-96 冷轧带材尺寸及厚度允许偏差（GB/T 15001—1994）

厚度 (mm)	厚度允许偏差 (mm)	宽度 (mm)	长度，不小于 (mm)
0.001 5	±0.000 15	10～40	10 000
>0.001 5～0.002	±0.000 2		
>0.002～0.003	±0.000 3		
>0.003～0.005	±0.000 5	10～100	
>0.005～0.01	±0.001		20 000
>0.01～0.04	0 −0.003		30 000
>0.04～0.09	0 −0.01	20～250	
>0.09～0.15	0 −0.02		20 000
>0.15～0.25	0 −0.03		6000
>0.25～0.40	0 −0.04	30～300	3000
>0.40～0.70	0 −0.05		
>0.70～0.95	0 −0.07		1000
>0.95～1.35	0 −0.08	80～300	
>1.35～1.75	0 −0.11		
>1.75～2.30	0 −0.13		
>2.30～3.00	0 −0.16		

表2.3-97 冷拉丝材的直径和允许偏差（GB/T 15001—1994）

直径（mm）	允许偏差（mm）
0.05～0.10	±0.010
>0.10～0.30	±0.014
>0.30～0.60	±0.018
>0.60～1.0	±0.020
>1.0～3.0	±0.030
>3.0～6.0	±0.038

表2.3-98 热轧扁材尺寸及允许偏差（GB/T 15001—1994）

厚度 (mm)	厚度允许偏差 (mm)	宽度 (mm)	宽度允许偏差 (mm)	长度不小于 (mm)
3.0～4.0	±0.2	20～300	+3 −2	800
>4.0～7.0	±0.3			500
>7.0～13.0	±0.4			
>13.0～22.0	±0.5			

表2.3-99 热轧棒材尺寸及允许偏差（GB/T 15001—1994）

直径（mm）	允许偏差（mm）
6～8	±0.30
>8～20	±0.35
>20～30	±0.40
>30～50	±0.50
>50～80	±0.70

表2.3-100 热锻材尺寸及厚度允许偏差（GB/T 15001—1994）

直径（mm）	允许偏差（mm）
9～12	±1.0
>12～35	±2.0
>35～50	±3.0
>50～80	±4.0
>80～100	±5.0

表 2.3-101 性能类别及牌号

序号	类别	典型牌号	特 性	用途举例
1	高方形系数	1J34、1J67、1J51、1J86j	方形系数高，饱和磁感应强度较高，有较高的最大磁导率值	磁放大器、双极性脉冲变压器、磁调制器、直流电压变换器、开关和存储铁心
2	高磁感应强度	1J50、1J55	非取向材料，具有较高的饱和磁感应强度值	中小功率电源变压器、磁屏蔽、漏电断路器、转子、定子
3	恒磁导率	1J66	在一定宽的磁场、温度、频率范围内、磁导率基本不变	恒电感元件，单极性脉冲变压器
4	高磁导率	1J79、1J77A	具有很高的最大磁导率和低的矫顽力	弱磁场下应用的高灵敏度小型功率变压器零序互感器、小功率磁放大器，高频变压器、磁头磁屏蔽、高灵敏度继电器
5	高初始磁导率	1J85 1J86	具有很高的初始磁导率及相当高的最大磁导率极低的矫顽力，低的损耗值	
6	硅钢带	DG1 DG2 DG3 DG4	高的磁感应强度值	中等功率变压器 扼流圈、磁放大器、脉冲变压器
7	超薄带	1J79	有较高的矩形比值，较低的矫顽力，开关系数小	磁带机、数字电压表数字电路和脉冲电路的开关元件，各种高频变压器
8	低剩磁类	1J34h、1J34kh 1J512、1J67h 1J6721、1J50h 1J79h	有较大的磁感增量（$\Delta B_m = B_m - B_r$），较小的损耗和矫顽力	半导体闸流管保护扼流圈、单极性脉冲变压器、漏电断路器

4.5.1 带绕环形铁心

在 YB/T 5251—1993 等标准中给出了用于电源变压器、磁放大器、磁调制器、脉冲变压器、恒电感元件，漏电保护器和高频电源等元器件使用，并由 Ni—Fe 系和 Fe—Si 系软磁合金卷绕而成的环形铁心标准，包括八类不同磁性能的 23 个牌号（见表 2.3-101）。图 2.3-47 为环形铁芯的形状示意图。尺寸规格及允许偏差见表 2.3-102、表 2.3-103。铁心的外内径比分三挡，即 $d_1/d_2=1.25$、1.5 和 2.0，相应的高度分二挡见表 2.3-104。

环形铁心特征参数计算如下：

平均磁路长度：$L_{Fe}=\pi\dfrac{d_1+d_2}{2}$

铁心横截面积：$A_{Fe}=\dfrac{d_1+d_2}{2}h\eta$

占空参数（又叫叠片系数）：$\eta=\dfrac{4G/\gamma}{3.14(d_1^2-d_2^2)h}$

式中：G 为铁心实际重量，γ 为铁心材料的密度。η 应附合

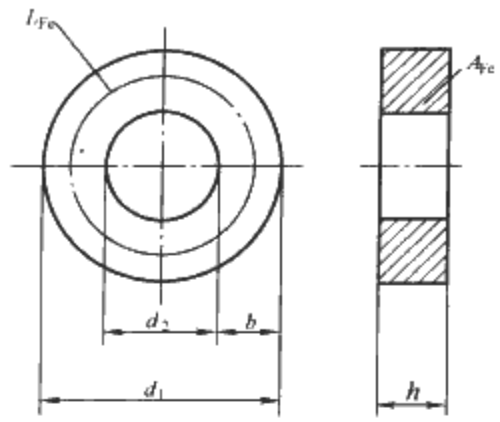


图 2.3-47 环形铁心形状示意图

d_1—铁心的外径，mm；d_2—铁心的内径，mm；
h—铁心的高度，mm；b—铁心的截面宽度，mm；
A_{Fe}—金属材料的横截面积，mm^2；
L_{Fe}—用算术平均值计算的磁路长度

表 2.3-105（a）或（b）的规定。

铁心体积：$V_{Fe}=A_{Fe}L_{Fe}$

铁心质量（重量）：$m_{Fe}=V_{Fe}\gamma=A_{Fe}L_{Fe}\gamma$

表 2.3-102 环形铁心尺寸系列 mm

d_1	$d_1/d_2=1.25$			$d_1/d_2=1.6$			$d_1/d_2=2$		
	d_2	h		d_2	h		d_2	h	
2.5	2	—	1	—	—	—	—	—	—
3.2	2.5	—	1.5	2	—	1	—	—	—
4	3.2	—	1.5	2.5	—	1.5	2	1	2
5	4	1	2	3.2	1	2	2.5	1.5	2
6.3	5	1.5	2	4	1	2	3.2	1.5	3
8	6.3	1.5	3	5	1.5	3	4	2	4
10	8	2	4	6.3	2	4	5	2	5
12.5	10	2	5	8	2	5	6.3	3	6
16	12.5	3	6	10	3	6	8	4	8
20	16	4	8	12.5	4	8	10	5	10
25	20	5	10	16	5	10	12.5	6	12.5
32	25	6	12.5	20	6	12.5	16	8	15
40	32	8	15	25	8	15	20	10	20
50	40	10	20	32	10	20	25	12.5	25
63	50	12.5	25	40	12.5	25	32	15	30
80	63	15	30	50	15	30	40	20	—
100	80	20	—	63	20	—	50	25	—

表 2.3-103 环形铁心尺寸允许偏差 mm

带材厚度	外径允许偏差	内径允许偏差	高度允许偏差	
			$d_1\leqslant 40$	$40<d_1\leqslant 100$
0.02 0.03	±0.2	±0.2	±0.6	±0.8
0.05	±0.04	±0.3		
0.08 0.10	±0.5	±0.4		
0.20	±0.7	±0.5		
0.30	±0.8	±0.6		

通常铁心重量的容许偏差为标称重量的±5%。

对于矩形回线的合金或在高频下应用的铁心，应尽量采用 $d_1/d_2=1.25$ 系列的尺寸。

对于交流电源用磁放大器，适合用 $d_1/d_2=1.6$ 系列铁心。

对于宽频带发射和脉冲变压器以及线路变压器用 $d_1/d_2=2.0$ 系列的铁芯较合适。一般来说，铁心的外内径之比不应超过 2.0。

表 2.3-106 为带绕环形铁心的最大外径及可供的带厚。

表 2.3-107 为带绕环形铁心的最小内径和高度值。

高牌号的软磁合金特别是高磁导率的 Fe—Ni 系坡莫合金带绕环形铁心对于各种加工方式，如在其上缠绕线圈以及装配、运输等过程中所造成的机械应力很敏感。因此必须保护铁心。最安全的方法是将铁心放入用塑料或铝制的保护盒内，并填以硅橡胶（硅脂）或泡沫环子以“固定”。塑料盒的承受温度应达 125℃以上。带有玻璃布和硅树脂盖的铝制盒可承受≤180℃。

表 2.3-104　　铁心高度标准比率

d_1/d_2	1.25	1.6	2.0
h/d_2	0.25 或 0.5	0.3 或 0.6	0.5 或 1.0

表 2.3-105（a）　　铁心的占空系数 η（允许偏差±0.02）

带材厚度（mm）	0.30	0.20	0.15	0.08 0.10	0.075	0.05	0.03 0.02
占空系数 η	不小于						
	0.95	0.93	0.92	0.90	0.875	0.85	0.80

表 2.3-105（b）　IEC 635-76 规定环形铁心的占空系数 η

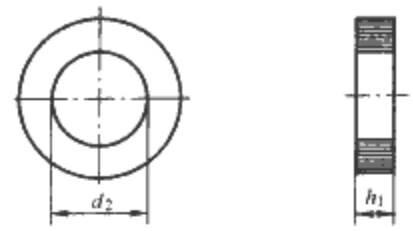
带厚（mm）	取向硅钢	其他所有合金
0.30	0.95	0.95
0.20	—	0.93
0.15	—	0.92
0.1	0.92	0.90
0.05	0.88	0.85
0.03	—	0.80
0.025	0.82	0.80
0.015	—	0.70
0.01	—	0.62
0.006	—	0.50
0.003	—	0.35

表 2.3-106　　带绕环形铁心的最大外径及可供带厚　mm

回线形状	材料	带厚						
		0.3～0.2	0.15	0.1	0.05	0.03	0.015	0.006
正常(R)回线	一般高 μ 合金（1J79、1J85）	1100～450		800～450	450			
	超高 μ 合金（1J77A）	1100～450		450	450	300	300	100
	1J50、1J50cd	450		450	450			
	取向硅钢	1100		800	450	300		
	1J22	200		200				
矩形(Z)回线	1J86J			300	300	300	100	100
	1J65、1J67、1J34		650	650	450	300	100	100
	1J51、1J52		650	650	450	300	100	
	1J22(超)		100	100	100			
扁平(F)回线	1J79H			100	80	80	40	
	1J672、1J6721			450	450	300		100
	1J512			450	450	300		

表 2.3-107　　环形带绕铁心的最小内径和铁心高度的典型值　mm

带厚（mm）	最小内径 d_2（mm）	最小铁心高度 h_1（mm）
≤0.05	4	3
0.1，0.15	10	3
0.2	20	5
0.3	30	10



4.5.2　带绕切割铁心

带绕切割铁心（C 铁心），可以使用绕好的线圈绕组，组装简单方便。这种类型的铁心特别适用于磁性择优方向处于轧制方向的取向硅钢。但对于很多用途，也用 Fe-Ni 系坡莫合金、非晶态或纳米晶软磁材料制成这类铁心。

带绕切割 C 型铁心的断面平整度，影响空气隙的大小。为获得满意的磁性能，断面常须进行精密磨光加工。

带绕切割铁心的形状可以是矩形，也可以是圆形。

不同材料带绕切割铁心的带厚和占空系数见表 2.3-108。

带绕切割铁心有 SK（圆形）及矩形的 SM、SE、SU、SG、S3U 六个系列（见图 2.3-48），其尺寸规格可查有关电子变压器的手册。

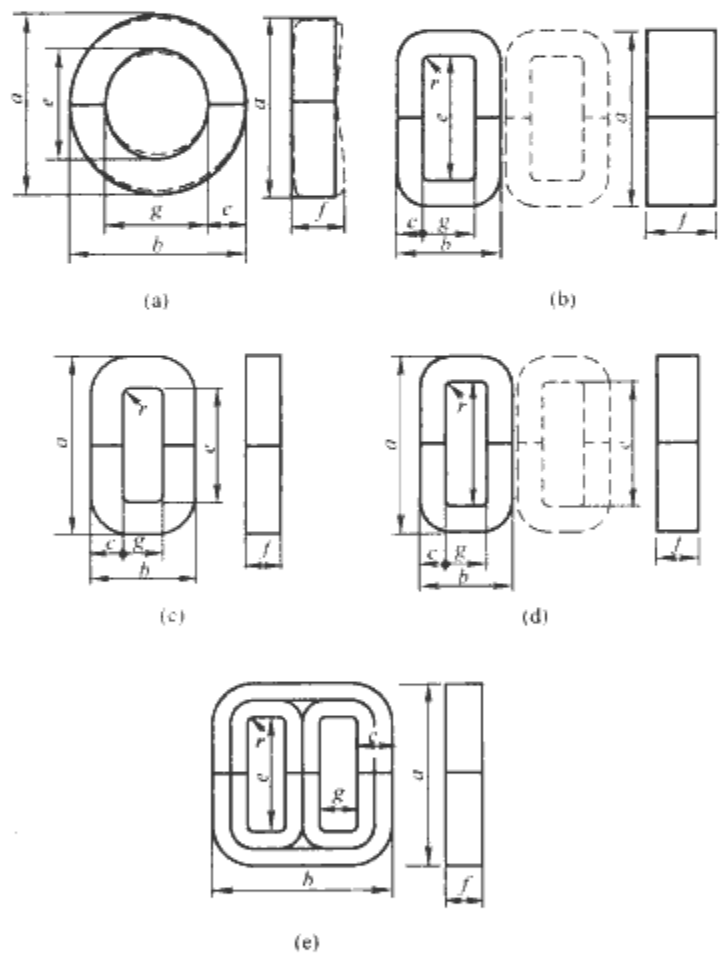


图 2.3-48　带绕切割铁心形状示意图
(a) SK 型；(b) SM 和 SE 型；
(c) SU 型；(d) SG 型；(e) S3U 型

带绕切割铁心的特征系数计算公式如下：

(1) 对于两心柱铁心（即 SM、SE、SU、SG 型）：

平均磁路长度：$L_{Fe}=a+b+e+g-1.72\left(r+\frac{c}{2}\right)$

磁芯横截面积：$A_{Fe}=C\min f\min\eta$

磁芯质量（重量）：$m_{Fe}=A_{Fe}L_{Fe}\gamma$

(2) 对于三心柱铁心（即 S3U 型）：

内磁路长度：$L_{Fel}=2(e+g+c)-1.72\left(r+\frac{c}{4}\right)$

外磁路长度：$L_{Fe2}=2(a+b-c)-1.72\left(r+\frac{3c}{4}\right)$

平均磁路长度：$L_{Fe}=L_{Fe1}+\frac{1}{2}L_{Fe2}$

铁心横截面积：$A_{Fe}=C_{min}f_{min}\eta$

铁心质量(重量)：$m_{Fe}=A_{Fe}L_{Fe}\gamma$

式中：η为铁心占空系数；γ为铁心材料的密度。

4.5.3 叠片铁心

用软磁合金带料的冲片，叠合而成的铁心为叠片铁心。这是软磁合金特别是硅钢片的最常用供货形式，在一些电器产品中坡莫合金的叠片铁心也应用广泛。这类铁心非常容易与绕好的线圈组装。

冲片表面通常都有一层氧化物绝缘层，它可以是在冲制前涂溥在钢带表面（如硅钢片），或在冲片热处理过程中产生（如坡莫合金）。叠片铁心的占空系数一般比带绕铁心略低（见表 2.3-108）。

表 2.3-108 叠片铁心的占空系数

带厚 (mm)	占空系数 η	
	取向 SiFe	NiFe，CoFe
0.35	0.95	0.94
0.2	—	0.90
0.1	0.90	0.85
0.05	0.88	0.80

叠片铁心的类型及尺寸可参阅有关硅钢使用手册或用户提出。一般来说，同一种铁心类型的尺寸越大，则磁性能越好。对于坡莫合金而言，厚度在 0.1mm 时，磁性能最佳，图 2.3-49 示出冲片铁心形状对磁化曲线及其矩形性的影响。

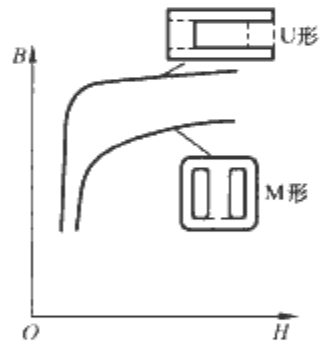


图 2.3-49 冲片铁心形状对磁化曲线及其矩形性的影响

在许多用途中希望把 EE 型、EI 型等叠片直接粘结成铁心供应。与单个叠片相比，这种制成坚实的铁心部件，占空系数提高（见表 2.3-109），更易加工和装配，断面可以精密研磨，使结合部漏磁很小，充分发挥材料的磁性能。也可以在 E 型中间心柱钻一孔，配上调节螺钉，控制空气隙的大小，从而调控铁心的磁性能。

表 2.3-109 粘结叠片铁心的占空系数

带厚 (mm)	占空系数 η	
	取向 SiFe	NiFe，CoFe
0.35～0.2	0.96	0.94
0.1	0.94	0.92

4.6 软磁合金特性总览和材料选择

4.6.1 主要生产品种和用途、特性

软磁合金的产品品种以薄带细丝为主，品种规格精密细小而多，使用部位重要，用途广泛。软磁合金牌号的主要用途和产品品种，见表 2.3-110。

软磁合金类材料以具有特殊物理性能而著称，软磁合金类材料的迅速发展也正源于此。按牌号其基本特性见表 2.3-111。

表 2.3-110 软磁合金牌号、主要用途和产品品种

标准号	产品牌号	主要用途	产品品种
GBn198	1J46、1J50 和 1J54	用于制作在中等磁场中使用的各种变压器、继电器、电磁离合器等铁心、马达定子、转子	半成品：冷轧带材、冷拉丝材、冷拔（轧）管材、热轧（锻）扁材和棒材 成品：各类铁心及其元器件
	1J76、1J77、1J79、1J80、1J85 和 1J86	用于制作在弱磁场中的各种变压器、互感器、磁放大器、扼流圈铁心以及磁屏蔽、磁头	
	1J34、1J51、1J52 1J65、1J67、1J83 和 1J403	用于制作在中磁场中使用的磁放大器、阻流圈、整流圈以及计算机装置元件等	半成品：冷轧带材 成品：各类铁心及其元器件
GB/T15004	1J06	用于制作电磁阀、电磁离合器中的铁心及电感元件	冷轧带材 热轧（锻）棒材
	1J12	用于制作中等磁场中使用的微电机磁放大器和继电器的铁心。可代替 1J46 合金使用	温轧带材
	1J13	用于制作磁致伸缩换能器元件	
	1J16	用于制作变压器、继电器铁心，磁屏蔽以及分频器中的高频元件	
GB/T 15003	1J66	用于制作恒电感元件	冷轧带材及铁心
GB/T 15005	1J30、1J31、1J32 和 1J38	用于制作电磁回路和永磁回路中的磁分路补偿元件	冷轧带材
GB/T 14986	1J36、1J116、1J117	在受介质、温度、压力影响条件下工作的各种控制系统中的电磁阀	热轧（锻）棒材
	1J116		冷轧带材
GB/T 15002	1J22	电磁铁极头，磁控管中的端焊管，电话耳机振动膜，力矩马达转子，磁致伸缩换能器铁心	冷轧带材 冷拉丝材 热轧（锻）扁材和棒材
GB/T 14987	1J87、1J88、1J89、1J90 和 1J91	各种磁带机磁头、芯片以及录音机、高频器件的铁心、马达	冷轧带材
YB/T086	1J75、1J77C、1J79C、1J85C、1J87C、1J92、1J93、1J94、1J95	定子、转子磁头外壳、芯片、隔离片、马达、定子、转子等	冷轧带材

表 2.3-111 软磁合金的基本特性

合金牌号	主要特性
1J46、1J50、1J54	具有较高的饱和磁感应强度和磁导率，1J54的电阻率较高
1J76、1J77 1J79、1J80 1J85、1J86	具有高的初始磁导率（在弱磁场中）
1J34、1J51 1J52、1J65 1J67、1J83 1J40	具有矩形磁滞回线、较高饱和磁感应强度和磁导率
1J06	具有较高的饱和磁感应强度、低的剩余磁感应强度及一定的抗大气腐蚀能力
1J12	较高的饱和磁感应强度和磁导率，在部分领域可代替1J46坡莫合金
1J13	较高的饱和磁致伸缩系数和饱和磁感应强度

续表

合金牌号	主要特性
1J16	较高磁导率，高电阻率，高硬度，作磁头有稳定的特性
1J30、1J31 1J32、1J33 1J38	在环境温度范围内，磁感应强度随温度变化而急剧变化，在居里点温度以下，磁感随温度上升成直线地降低
1J36、1J116 1J117	较高饱和磁感应强度，较低的剩余磁感应强度，在水气、盐雾或胼类介质中耐腐蚀
1J66	在较宽的磁场、温度和频率范围内，磁导率变化很小
1J22	高饱和磁感应强度、高居里点和高磁致伸缩系数
1J87、1J88、 1J89、1J90、 1J91	高初始磁导率、高硬度、高电阻率，而且磁性对应力不敏感，耐磨性好

4.6.2 各牌号的化学成分

各牌号的化学成分见表2.3-112。

表 2.3-112-1 各牌号的化学成分

类别	合金牌号	化学成分（%，质量分数）										
		C	P	S	Mn	Si	Ni	Cr	Co	Mo	Cu	Fe
		不大于										
高磁导率较高饱和磁感应强度较磁合金	1J46	0.03	0.020	0.020	0.60～1.10	0.15～0.30	45.0～46.5	—	—	—	≤0.20	余量
	1J50	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	49.0～50.5	—	—	—	≤0.20	余量
	1J54	0.03	0.020	0.020	0.60～1.10	1.10～1.40	49.5～51.0	3.80～4.20	—	—	≤0.20	余量
高初磁导率软磁合金	1J76	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	75.0～76.5	1.80～2.20	—	—	4.80～5.20	余量
	1J77	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	75.5～78.0	—	—	3.90～4.50	4.80～6.00	余量
	1J79	0.03	0.020	0.020	0.60～1.10	0.30～0.50	78.5～80.0	—	—	3.80～4.10	≤0.20	余量
	1J80	0.03	0.020	0.020	0.60～1.10	1.10～1.50	79.0～81.5	2.60～3.00	—	—	≤0.20	余量
	1J85	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	79.0～81.0	—	—	4.80～5.20	≤0.20	余量
	1J86	0.03	0.020	0.020	≤1.00	≤0.30	80.5～81.5	—	—	5.80～6.20	—	余量
矩磁合金	1J34	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	33.5～35.0	—	28.5～30.0	2.80～3.20	≤0.20	余量
	1J51	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	49.0～50.5	—	—	—	≤0.20	余量
	1J52	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.1～0.30	49.0～51.0	—	—	1.80～2.20	≤0.20	余量
	1J65	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	64.5～66.0	—	—	—	≤0.20	余量
	1J67	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	64.5～66.0	—	—	1.80～2.20	≤0.20	余量
	1J83	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	78.5～79.5	—	—	2.80～3.20	≤0.20	余量
	1J403	0.03	0.020	0.020	0.30～0.60	0.15～0.30	39.0～41.0	—	24.5～25.5	3.80～4.20	—	余量
恒导磁合金	1J66	0.03	0.020	0.020	0.70～1.10	0.10	64.5～65.5	—	—	—	—	余量

表 2.3-112-2

类别	合金牌号	C	S	P	Mn	Si	Ni	Mo	Al	Nb	Ti	Fe
		不大于										
高硬度、高电阻、高磁导率合金	1J87	0.03	0.020	0020	0.30～0.60	≤0.30	78.5～80.5	1.6～2.2	—	6.5～7.5	—	余量
	1J88	0.03	0.020	0020	≤0.60	≤0.30	79.5～80.5	—	—	7.5～9.0	—	余量
	1J89	0.03	0.020	0020	0.50～1.00	≤0.30	78.5～80.5	3.5～4.5	—	3.0～3.6	1.8～2.8	余量
	1J90	0.03	0.020	0020	≤0.60	≤0.30	79.0～80.0	1.8～2.2	0.40～0.60	4.8～7.2	—	余量
	1J91	0.03	0.020	0020	≤0.60	≤0.30	78.5～80.5	—	0.90～1.20	7.7～8.4	—	余量

表 2.3-112-3

合金牌号	C	P	S	Si	Mn	Ni	Mo	Nb	Cu	W	Cr	Fe
	不大于											
1J75	0.03	0.020	0.020	≤0.30	0.50～1.00	74.0～76.0	1.5～2.0	—	5.0～7.0	1.0～1.5	—	余量
1J77C	0.03	0.020	0020	≤0.30	≤0.70	76.5～78.0	3.5～4.5	—	3.8～5.3	—	—	余量
1J79C	0.03	0.020	0020	0.30～0.60	0.70～1.20	78.0～81.5	3.7～4.5	—	—	—	—	余量
1J85C	0.03	0.020	0020	0.15～0.30	0.30～0.70	80.0～81.5	5.0～6.0	—	—	—	—	余量
1J87C	0.03	0.020	0020	≤0.30	0.30～0.60	80.0～81.5	1.0～2.0	4.0～5.5	—	—	—	余量
1J92	0.03	0.020	0020	≤0.30	≤0.60	80.1～81.1	1.0～1.5	3.0～4.0	—	1.0～1.5	—	余量
1J93	0.03	0.020	0020	≤0.30	0.30～0.60	80.5～81.5	3.0～4.0	3.0～4.5	—	—	—	余量
1J94	0.03	0.020	0020	≤0.30	0.30～0.60	79.5～81.0	4.5～5.0	0.6～1.0	1.5～2.5	—	0.3～0.7	余量
1J95	0.03	0.020	0020	2.80～3.30	—	83.0～84.0	1.2～1.6	0.4～0.6	—	—	—	余量
1J22	0.04	0.020	0.020	0.30	0.30	0.50	0.20	49.0～51.0	0.80～1.80	余量		

表 2.3-112-4

合金牌号	化学成分（%，质量分数）						
	C	P	S	Mn	Si	Al	Fe
	不大于						
1J6	0.04	0.015	0.015	0.10	0.15	5.5～6.5	余量
1J12	0.03	0.015	0.015	0.10	0.15	11.6～12.4	余量
1J13	0.04	0.015	0.015	0.10	0.15	12.8～14.0	余量
1J16	0.03	0.015	0.015	0.10	0.15	15.5～16.3	余量

表 2.3-112-5

合金牌号	C	P	S	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Fe
	不大于								
1J116	0.03	0.020	0.020	0.20	≤0.60	—	15.5～16.5	—	余量
1J117	0.03	0.020	0.020	0.15	0.30～0.70	0.50～0.70	17.0～18.5	0.30～0.70	余量
1J36	0.03	0.020	0.020	0.20	≤0.60	35.0～37.0	—	—	余量

4.6.3 合金的基本物理特性和力学性能

合金的基本物理特性和力学性能见表 2.3-113。

表 2.3-113-1　　合金的基本物理参数和典型力学性能

合金牌号	电阻率（μΩ·m）	密度（g/cm³）	居里点（℃）	饱和磁致伸缩系数（×10⁻⁶）	布氏硬度（HB）		抗拉强度（MPa）		屈服强度（MPa）		伸长率（%）	
					冷硬态	软态	冷硬态	软态	冷硬态	软态	冷硬态	软态
1J46	0.45	8.2	400	25	170	130	735	—	735	—	3	—
1J50	0.45	8.2	500	25	170	130	785	450	685	150	3	37
1J54	0.90	8.2	360	—	190	125	885	500	835	150	2	40
1J403	0.55	8.55	600	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1J76	0.55	8.6	400	2.4	—	—	—	—	—	—	—	—
1J77	0.55	8.6	350	1	230	110	980	540	960	125	2	40
1J79	0.55	8.6	450	2	210	120	1030	560	980	150	3	50
1J80	0.62	8.5	330	1	240	130	930	560	885	150	4	40
1J85	0.56	8.75	400	0.5	230	120	1040	550	990	150	—	—
1J86	0.60	8.85		0.5	—	—	—	—	—	—	—	—
1J34	0.50	8.70	580	—	156	130	960	540	920	—	4	42
1J51	0.45	8.20	500	5	170	130	720	450	720	160	—	37
1J52	—	8.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1J65	0.25	8.35	600	20	—	—	—	540	—	—	—	43
1J67	0.45	8.48	530	—	230	130	930	540	—	160	3	50
1J83	0.50	8.60	460	—	—	—	1030	490	—	—	3	50
1J87	0.75	8.75	—	—	—	Hv190						
1J88	0.70	8.80	—	0.7	—	Hv180						
1J89	0.85	8.70	—	—	—	Hv200						
1J90	0.85	8.77	—	—	—	Hv250						
1J91	0.80	8.66	—	—	—	Hv300						
1J75	0.55	8.60	360			Hv120						
1J77C	0.55	8.60	350	1		Hv120	980	540			2	40
1J79C	0.55	8.60	400	2		Hv120	1030	560	980	150	3	50
1J85C	0.60	8.75	400	0.5		Hv120						
1J87C	0.64	8.7	380			Hv150						
1J92	0.65	8.82	380			Hv140						
1J93	0.65	8.80	330			Hv140						
1J94	0.66	8.80	320			Hv130						
1J95	0.65	8.60	320			Hv140						
1J66	0.25	8.25	600									
1J22	0.40	8.20	980	60～100			1325	490		400		
1J6	0.70	7.20	730									
1J12	1.00	6.70	655									
1J13	0.90	6.60	510									
1J16	1.50	6.50	400			200		500		300		5
1J36	0.80	8.10	230±20	22				450		250		40
1J116	0.44	7.75	670～700		188（热锻）			390				30
1J117		7.77	670～700					390				37
1J55	0.45	8.25	550			100～110						

表 2.3-113-2　　合金的平均线膨胀系数

合金牌号	在下列温度范围内的线膨胀系数（×10⁻⁶℃⁻¹）								
	20～100	20～200	20～300	20～400	20～500	20～600	20～700	20～800	20～900
	（℃）								
1J50	8.9	9.2	9.2	9.2	9.4	—	—	—	—
1J79	10.3～10.8	10.9～11.2	11.4～12.9	11.9～12.5	12.3～13.2	12.7～13.4	13.1～13.6	13.4～13.6	13.2～13.8
1J80	12.8～13.0	12.5～12.7	13.1～13.4	13.4～13.8	13.9～14.4	14.2～14.8	14.5～15.2	15.0～15.6	15.5～15.6

表 2.3-113-3　　合金的平均线膨胀系数

牌号 / 平均膨胀系数	1J16	1J22	1J36	1J55	1J77	1J85
α（20～100℃）（×10⁻⁶℃⁻¹）	15	9.2	2	10	12.7	12.2

4.6.4 推荐热处理工艺

合金的推荐热处理工艺见表 2.3-114。

表 2.3-114-1 推荐的试样热处理制度（GBn 197—1983）

合金牌号	退火介质	加热温度及速度	保温时间(h)	冷却制度	备注
1J46、1J50 1J79、1J83	零点不高于-40℃的氢气	随炉升温 1050～1150℃	3～6	以 100～200℃/h 速度冷却到600℃快冷至300℃出炉	
1J51、1J52		随炉升温 1050～1100℃	1	以 100～200℃/h 速度冷却到600℃炉冷至300℃出炉	
1J34、1J65 1J67		第一步：随炉升温 1000～1150℃	3～6	以 100～200℃/h 速度冷却到600℃炉冷至300℃出炉	
		第二步：随炉升温 650～700℃	1～2	在 1.2～1.6kA/m 纵向磁场中以30～100℃/h速度冷却至200℃出炉	
1J54		随炉升温 1100～1150℃	3～6	以 100℃/h 速度冷却至 300℃出炉	
1J76		随炉升温 1100～1150℃	3～6	以 100℃/h 速度冷却到 500℃，然后以 10～50℃/h 速度冷却至300℃出炉	
1J77		随炉升温 1100～1200℃	3～6	以 100～150℃/h 速度冷却到500℃，然后以 30～50℃/h 速度冷却至300℃出炉	
1J80		随炉升温 1100～1150℃	3～6	以 100～200℃/h 速度冷却至400℃出炉	
1J85		随炉升温 1100～1200℃	3～6	以 100～200℃/h 速度冷却到480℃快冷至400℃出炉	
1J86		随炉升温 1100～1200℃	3～6	以 100℃/h 速度冷却到 600℃，然后以 30～50℃/h 速度冷却至300℃出炉	
1J66		第一步：随炉升温 1200℃	3	以 100℃/h 速度冷却到 600℃炉至300℃出炉	
		第二步：随炉升温 650℃	1	在大于 16kA/m 横向磁场中以50～100℃/h速度冷却至200℃出炉	
1J6		随炉升温 950～1050℃	2～3	以 100～150℃/h 速度冷却至250℃出炉	
		随炉升温 900～1000℃	2～3	炉冷至 250℃出炉	适用于做电磁阀铁心
1J12		随炉升温 1050～1200℃	2～3	以 100～150℃/h 速度冷却到500℃快冷（吹风）至200℃出炉	
1J13		随炉升温 900～950℃	2	以 100℃/h 速度冷却到 650℃，然后以不大于 60℃/h 速度冷却至200℃出炉	
		随炉升温 780～800℃	2	以 100℃/h 速度冷却到 650℃，然后以不大于 60℃/h 速度冷却至200℃出炉	适用于要求线播声速稳定的元件
1J16		随炉升温 950℃保温 4h，再随炉升温到 1050℃	1.5	炉冷到 650℃冰水淬	磁性能要求不高时可在空气中热处理
1J22		随炉升温 850～900℃	3～6	以 50～100℃/h 速度冷却到750℃，然后以 180～240℃/h 速度冷却至300℃出炉	适用于冷轧带材试样
		随炉升温（1100±20)℃	3～6	以 50～100℃/h 速度冷却到850℃保温 3h，然后以 30℃/h 速度冷却到 700℃，再以 200℃/h 速度冷却至300℃出炉	适用于锻坯取的试样
1J22		随炉升温（850±10)℃	4	以 50℃/h 速度冷却到 750℃保温3h，然后以 200℃/h 速度冷却至300℃出炉。由保温（750℃）开始加 1.2～1.6kA/m 直流纵向磁场	适用于要求在较低磁场下具有较高磁感应强度较低矫顽力较高矩形比情况
1J30、1J31、 1J32、1J33、1J38		随炉升温（800±10)℃	2	炉冷至 200℃出炉	

续表

合金牌号	退火介质	加热温度及速度	保温时间(h)	冷却制度	备注
1J75	氢气①	950～1100	2～3	以100～200℃/h速度冷至450℃后快冷	
1J77C		1050～1150	2～4	以200℃/h速度冷至450℃后快冷	
1J79C		1050～1150	3～6	以100～200℃/h速度冷至300℃后出炉	
1J85C		1050～1150	2～6	炉冷至600℃后，以200℃/h速度冷至300℃出炉	
1J87C		1050～1150	2～4	以150～200℃/h速度冷至600℃，以200～300℃/h速度冷却	
1J92		950～1150	3～4	以150～200℃/h速度冷至600℃，以200～300℃/h速度冷却	
1J93		1050～1150	2～6	以200℃/h速度冷至500～550℃后快冷	
1J94		1050～1150	2～4	以200℃/h速度冷至400℃后快冷	
1J95		1050～1150	3～4	以200℃/h速度冷至550～600℃后快冷	

① 露点小于－40℃。

表 2.3-114-2

合金牌号	退火介质	合金带厚度(mm)	加热温度（℃）（随炉升温）	保温时间(h)	冷却制度
1J87	干氢或真空①	≤0.20	950～1150	2～3	以100℃/h速度冷却到500℃保温1h，再以10～30℃/h冷却到350℃后炉冷到200℃出炉
		>0.20	1150～1250	4～6	
1J88	干氢或真空①	≤0.20	950～1150	2～3	以100～200℃/h（或炉冷）冷却到500～600℃后炉冷（200～300℃/h）冷却到200℃出炉
		>0.20	1150～1250	4～5	
1J89	干氢或真空①	≤0.20	950～1100	2～3	以200～300℃/h冷却到200℃出炉或以200～300℃/h冷却到600℃保温1～4h，再以100℃/h冷却到200℃出炉
		>0.20	1100～1200	3～5	
1J90	干氢或真空①	≤0.20	1000～1150	2～3	炉冷至250℃出炉（或以250℃/h冷至250℃出炉）
		>0.20	1000～1200	3～4	
1J91	干氢或真空①	≤0.20	1100～1150	2～3	炉冷至室温后，再升温至970℃保温1h（介质为H_2或惰性气体）拉到炉口冷却
		>0.20	1100～1200	3～4	

① H_2露点小于－40℃，真空度小于10^{-3}mmHg。

4.6.5 高磁导率合金（R型回线）的选择

表2.3-115为高磁导率合金的性能和牌号选择，表2.3-116为低矫顽力（H_c）大块实体材料的性能和牌号选择。图2.3-50为软磁材料的有效磁导率μ_e（1kHz，$H=0.4$A/m）和B_s关系，图2.3-51为软磁材料的B_s和H_c关系。

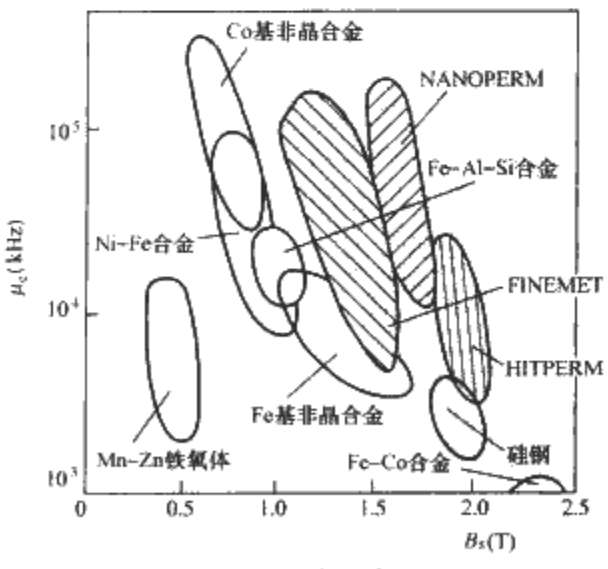


图2.3-50 软磁材料的有效磁导率μ_e（1kHz，$H=0.4$A/m）和B_s关系
（Finmet、Nonoperm、Hitperm均为纳米晶材料）

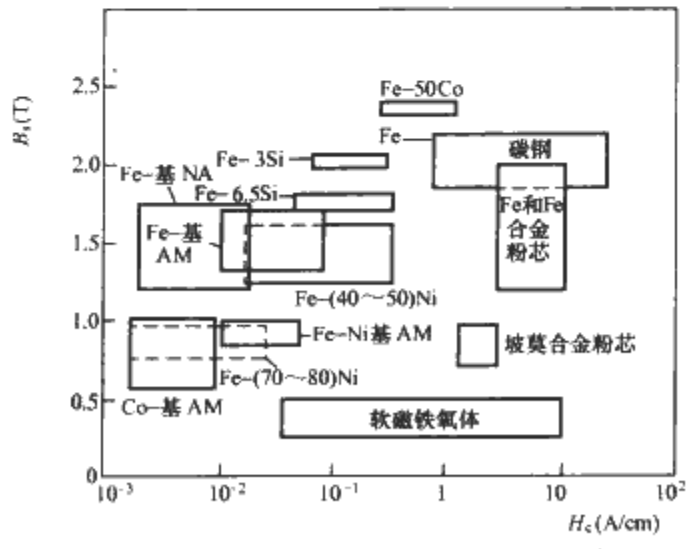


图2.3-51 软磁体的B_s和H_c关系示意
（AM—非晶态合金；NA—纳米晶材料）

表 2.3-115 **高磁导率合金的选择**

B_s (T)	磁导率 μ_i（50Hz，H=0.4A/m）					
	20 万～30 万	10 万～15 万	9 万～10 万	5 万	2 万～3 万	900～12 000
≈0.55	←Co 基 AM→				Co 基非晶 6025×（制备态）	
≈0.60～0.8	1J77A	1J77 1J86	1J85	1J79		
≈1.0～1.45		←Fe 基 NA→（Finemet 型）（牌号 1K107 或 FT-1M、2M、3M）			VacopermBs①	
≈1.5～1.55				1J55、1J50cd		1J50、1J46
≈1.6～1.75		←Fe 基 NA→（Nanoperm 型）				

① 此牌号为德国 VAC 公司独有牌号。AM-非晶态合金 NA-纳米晶合金。

表 2.3-116 **低矫顽力（H_c）大块实体材料的选择**

B_s (T)	直流 H_c（A/m）					
	1.0	2～2.5	3.0～4.0	5.0～12	20～25	100～150
≈0.60～0.8	1J86 1J77、1J77A	1J79 1J85				
≈1.0		VacopermBS				
≈1.3～1.5				$Ni_{38}Cr$	1J36	
≈1.55～1.60	←1J50→					
≈2.1				纯铁	硅钢	
≈2.35						1J20 1J22

4.6.6 矩形磁滞回线合金（Z 型回线）的选择

表 2.3-117 为 Z 矩形磁回线合金的性能和牌号选择，表 2.3-118 为矩回合金的损耗和矩形比选择。

4.6.7 低剩磁和恒磁导率合金（F 型回线）的选择

表 2.3-119 为扁平 F 形回线合金的性能和牌号选择，表 2.3-120 为扁平回线交直流叠加磁导率特性的材料选择。

表 2.3-117 **矩形磁滞回线合金的选择**

B_s（T）	矫顽力 H_c（A/m）							B_r/B_s
	0.3	0.6～0.8	1.0～2.0	3.0	8.0	12	20	
0.55～0.60	钴基非晶 6025Z 2714AS		1J86j					0.9
0.7～0.8		Co 基非晶 6030Z	钴基非晶 1K201j					0.91～0.95
1.0			钴基非晶 6150Z					0.95
1.2～1.35		铁基超微晶 FT-1H、3H	1J67					0.85～0.98
1.4～1.6			1J34 1J40 铁基超微晶 FT-2H	铁基非晶 7505Z 1K102j	1J51	1J52		0.85～0.98
1.75					铁基非晶 7600Z			0.9
2.35							1J22（超）	0.97

表 2.3-118　　矩回合金的损耗和矩形比选择（0.05mm厚）

B_s	$P_{1.0/2.4K}$ (W/kg)				B_r/B_m
	<30	30～35	35～40	40～50	
1.25				1J67	0.90～0.95
1.35～1.45	Ni35CoSiCr	1J40			0.95～0.99
1.50～1.60		1J34	1J51		0.95～0.99

表 2.3-119　　扁平回线合金的选择

B_s（T）	矫顽力 H_c（A/m）					B_r/B_s	ΔB（T）	μ_r（τ=20～50μs）
	0.3	0.6	1.0～2.0	3.0～4.0	7.0			
0.55～0.6	钴基 AM 6025F 2714AF					0.02	0.4	70 000～100 000
0.7～0.75			1J79H			0.1～0.2	0.4	10 000
0.8			钴基 AM 6030F 1K201H			0.05	0.7	2500～3500
1.0				钴基 AM 6050F		0.05	0.9	1100～3000
1.2～1.35		铁基 NA 500F FT-3L、3S	铁基 NA FT-1L		1J67h	0.1	0.8	4000
1.45～1.55				铁基 AM 7505F 1K102H 铁基 NA FT-2L	1J512 1J34Kh	0.05～0.1	1.1～1.3	4000～8000

表 2.3-120　　扁平回线交直流叠加磁导率特性的材料选择

磁导率恒定时的最大磁场 H_o（A/m）	交直流叠加时的磁导率								
	大于1万	2万～8万	6500～8000	3000～4000	1000～2000	700	500～600	250～300	80～150
16	钴基 AM 6025F 2714AF								
4～40		铁基 NA 500F 800F							
20～40			1J79H						
160				钴基 AM 6030F 1J201H					
240～320			铁基 AM 7505F 1K102H	1J66	钴基 AM 6050F				
560					钴基 AM 6200F				
800					1J34H	钴基 AM 6125F		铁基 AM 1K101H	
1600～2000							1J34KH		
6400～8000									1J50H

4.6.8 在交流磁化状态下的应用选择

表 2.3-121 为铁钴合金和取向硅钢的工作磁感和损耗。图 2.3-52 为极限频率（f_w）与材料 μ_i（$H=0.4A/m=4mA/cm$），电阻率（ρ）和带厚（d）之间关系。根据应用要求（f_w）可选合金，也可根据已知合金的特性预测其应用频率范围。

表 2.3-121　　取向硅钢和铁钴合金的磁感和损耗　　W/kg

B_s (T)	B_m (T)	$P_{1.5/50}=1$ (0.3mm 厚)	$P_{1.7/50}=1$ (0.3mm 厚)	$P_{2.0/50}=1.8$ (0.2mm 厚)	$P_{1.5/400}=1.5$ (0.1mm 厚)	$P_{1.8/400}=30$ (0.1mm 厚)
2.03	1.70～1.80	一般取向硅钢	HI-B硅钢		一般取向硅钢	
2.35	2.00			1J22		1J22Y（优质）

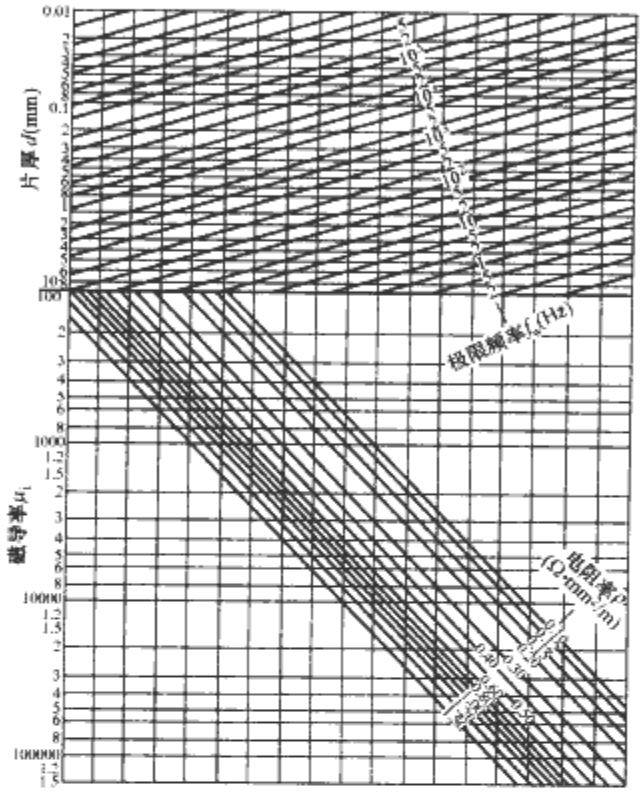


图 2.3-52　为极限频率（f_w）与 μ_i（$H=0.4A/m=4mA/cm$），或电阻率（ρ）和片厚（d）的关系（根据经典涡流理论）

软磁合金的损耗是最重要的技术参数，实测表明各种软磁合金不论其是 Fe 基、Co 基、Ni 基合金，也不论其结构（结晶态、非晶态或纳米晶）和畴结构（180°畴、90°畴……）如何，磁滞回线形状（矩形、低 B_r 扁平形和正常形……）如何，在一定 B_m 下的总损耗 $P_t \sim f$ 关系和一定 f 下的 $P_t \sim B_m$ 关系，在双对数坐标中均显极好的线形关系，如图 2.3-16、图 2.3-18、图 2.3-25 所示。这是“分形结构”的典型特性，可以用 $P_t = P_0 B_m^{D_1} f^{D_2}$ 表示，D_1、D_2 为损耗谱的分形维数，P_0 为有量纲的系数。分形维数越大，铁心损耗特性越差。该公式统一表达了各种损耗机制（磁滞、涡流、剩余损耗等）所引起的总损耗随 f 和 B_m 值的变化，也反映了软磁合金在交流磁化时非线性变化的本质。表 2.3-122 给出了一些晶态、非晶态以及纳米晶软磁合金的损耗公式。所取合金的磁性如 μ_i、μ_m、H_c 等都达到了技术标准要求，故是典型值。由此得到的这些损耗公式对选材、设计及预测各类合金的交流磁性极有参考价值。

4.6.9 磁性能对温度的依赖关系

图 2.3-53 给出了一些合金的 B_s 与环境温度关系曲线。当 B_s 为零的温度即是该合金的居里温度（T_c）。

表 2.3-122　　一些典型软磁合金的损耗回归式

磁性状态	材料	带厚 (mm)	Pt（W/kg）	条　件
普通回线（尺形）	Ni79Mo4（Vacoperm100）	0.100 0.200	$7.4548B_m^{2.0519}f^{1.6067}$ $16.4746B_m^{2.1621}f^{1.7150}$	f：0.4～20kHz B_m：0.02～0.6T
	Ni80Mo5 或 Ni77Mo4Cu5 （Ultraperm10） （UltrapermF）	0.015 0.030 0.050	$1.877\,8B_m^{2.0952}f^{1.3434}$ $2.050\,0B_m^{2.0495}f^{1.5007}$ $2.963\,2B_m^{1.8359}f^{1.5088}$	f：1～30kHz B_m：0.02～0.6T
	Ni55（PermaxM）	0.100	$13.355\,0B_m^{1.7647}f^{1.7717}$	f：2～20kHz B_m：0.02～1.4T
	Ni50	0.050 0.100	$7.712\,9B_m^{1.7802}f^{1.4224}$ $14.147\,0B_m^{1.8634}f^{1.5184}$	f：0.4～20kHz B_m：0.01～1.0T
	纳米晶 Fe76.9Cu0.6Nb2.5Si13B7 （B_s1.32T μ_e7.5 万，H_c1.6A/m）	0.020	$0.63B_m^2f^{1.72}$	f：10～300kHz B_m：0.1～0.7T
矩形回线（Z 形）	高 Ni 坡莫合金 （UltrapermZ）	0.050	$3.4142B_m^{1.7274}f^{1.5635}$	f：0.4～20kHz B_m：0.05～0.6T
	Co 基非晶 （Vitrovac 6025Z）	0.020	$0.660\,7B_m^{1.5095}f^{1.4175}$ 或 $0.173\,0(\Delta B_m)^{1.7435}f^{1.6153}$	f：20～200kHz B_m：0.1～0.4T ΔB_m：0.1～0.4T

续表

磁性状态	材料	带厚（mm）	Pt（W/kg）	条 件
矩形回线（Z形）	Co基非晶（2714AS）	0.018	$0.51B_m^{1.76}f^{1.57}$	f：10～300kHz B_m：0.01～0.5T
	纳米晶 Fe73.5Cu1Nb3Si15.5B7（Vitroperm 500Z）	0.020	$0.42(\Delta B_m f)^{1.5}$	f：1～200kHz B_m：0.2～2.0T
低 B_r 扁平回线（F形）	Ni65Mo2（1J6721，PermaxF）	0.050	$7.792\,9B_m^{1.847\,7}f^{1.359\,4}$	f：1～200kHz B_m：0.02～0.9T
	Co基非晶（6025F）	0.020	$0.232\,0B_m^{2.030\,3}f^{1.7071}$	f：10～100kHz B_m：0.02～0.4T
	Co基非晶（6030F）	0.020	$0.419\,8B_m^{2.114\,0}f^{1.7343}$	f：5～200kHz B_m：0.05～0.7T
	Co基非晶（2714AF）	0.018	$0.182B_m^{1.99}f^{1.75}$	f：20～100kHz B_m：0.1～0.4T
	低 B_r2605SA1（μ=250/285）	0.020	$71.5B_m^{2.475}f^{1.125}$	f：25～300kHz B_m：0.02～1T
	纳米晶 Fe73.5Cu1Nb3Si15.5B7（Vitroperm 500F）	0.020	$0.082\,5B_m^{2.079}f^{2.021}$	f：20～200kHz B_m：0.01～0.9T

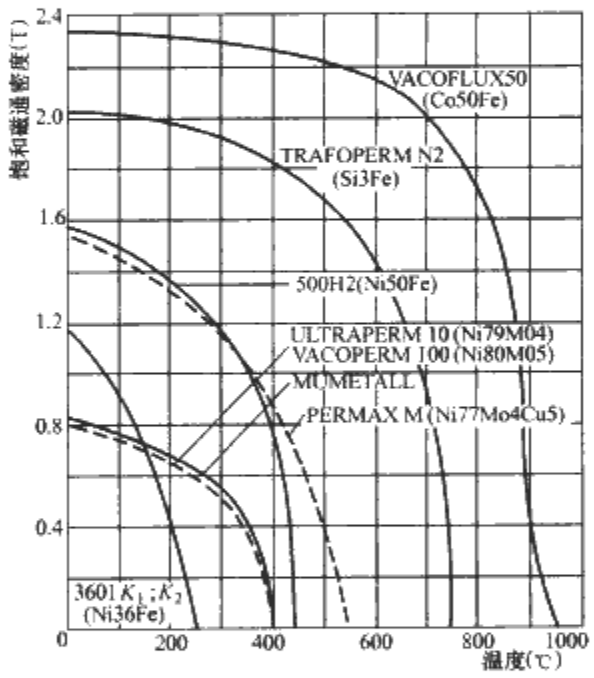


图 2.3-53 一些材料的磁通密度—温度曲线（f=50Hz）

磁导率与温度的关系较为复杂，除与合金成分有关外，还与热处理工艺有关。采取一定的补偿处理（或稳定化处理），可以在某个给定的温度范围得到正的或负的温度系数，恒定的磁导率或者在低温下得到高的磁导率。

图 2.3-54 示出补偿处理（稳定化处理）对 Ultraperm10（1J77 合金）磁通密度（$\hat{B}$）—磁场强度（Heff—磁场有效值）曲线的影响。表 2.3-123 为典型软磁合金主要磁特性相对于温度的变化。表 2.3-124 为典型软磁合金的居里温度和允许的最高使用温度。

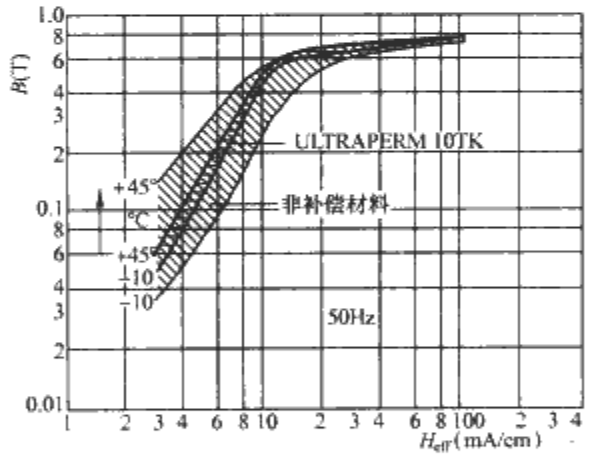


图 2.3-54 温度补偿处理 Ultraperm10（1J77 合金）TK 和非补偿材料的磁通密度—磁场强度曲线

表 2.3-123 典型软磁合金主要磁特性相对变化与温度关系

合金类别	合金名称	带厚（mm）	温度范围（℃）	相对于20℃时的变化(%)			
				μ_i	μ_{max}	H_c	B_s
在弱场中具有最高磁导率的合金	1J76、1J77、1J79 1J85、1J86 1J80	0.05～0.35	(−60)～(+20)	(−60)～(+60)	−(10～60)	+(10～60)	+(3～5)
			20～60	(−10)～(+20)	+(5～20)	−(5～15)	−(2～3)
			20～120	(−30)～(+70)	+(10～30)	−(10～30)	−(8～10)
具有高磁导率和较高饱和磁感的合金	1J46、1J50	0.05～0.35	(−60)～(+20)	−(5～50)	−(5～20)	+(10～30)	+(2～3)
			20～60	+(5～25)	+(5～10)	−(5～10)	−(2～3)
			20～120	+(10～60)	+(5～25)	−(5～25)	−(4～6)

续表

合金类别	合金名称	带厚 (mm)	温度范围 (℃)	相对于 20℃时的变化(%)			
				μ_i	μ_{max}	H_c	B_s
具有矩形磁滞回线的合金	1J51	0.02～0.1	(−60)～(+20)	—	<[15]	<[15]	+(2～3)
			20～60	—	<[10]	<[10]	−(2～3)
			20～120	—	<[20]	<[20]	−(1～6)
	1J34 1J403 1J67	0.02～0.1	(−60)～(+20)	—	<[15]	<[15]	+(2～3)
			20～60	—	<[10]	<[10]	−(2～3)
			20～120	—	<[15]	<[15]	−(4～6)
恒导磁合金	1J66	0.01～0.1	(−60)～(+20)	−(2～5)	−(2～5)	—	—
			20～60	+(2～3)	+(2～3)	—	—
			20～120	+(3～6)	+(3～6)	—	—

表 2.3-124 常用 Fe-Ni 系坡莫合金的最高工作温度

牌 号	1J79	1J77	1J85	1J86	1J50	1J51	1J67	1J34	1J46	1J22	1J66
居里温度 (℃)	450	350	400	—		500	530	580	400	980	600
最高工作温度 (℃)	150	100			250		100		150	400	120

5 软磁铁氧体

软磁材料是指对于磁通密度以及磁极化强度具有低矫顽力的磁性材料，它与硬磁材料的界线是矫顽力值为 1～10kA/m。习惯上也说软磁材料是在较弱磁场下易磁化，也易退磁的一种材料。某些结构的铁氧体材料具有这种特性称为软磁铁氧体（Soft ferrite），其典型的代表是锰铁氧体（$MnFe_2O_4$）、镍铁氧体（$NiFe_2O_4$）、锌铁氧体（$ZnFe_2O_4$）。上述材料按 x：（1−x）比例组成固溶体时，称为复合铁氧体，如锰锌铁氧体（$Mn_xZn_{(1-x)}Fe_2O_4$）、镍锌铁氧体（$Ni_xZn_{(1-x)}Fe_2O_4$）。锰锌、镍锌铁氧体是两种典型的软磁铁氧体材料，它们的晶体结构为尖晶石型结构（天然尖晶石分子式是 $AgAl_2O_4$），通常称之为尖晶石型铁氧体。晶体结构属于立方晶系，标准的化学分子式是 $MeFe_2O_4$（也可写成 AB_2O_4），其中 Me 为二价金属离子：Mg^{2+}、Mn^{2+}、Ni^{2+}、Fe^{2+} 等，而 Fe 是三价离子，可被其他三价离子 Al^{3+}、Cr^{3+} 或 Fe^{2+}、Ti^{4+} 代替，只要几个金属离子的化学价总数为 8，能与四个氧离子化学价平衡即可。

尖晶石型晶体结构的一个晶胞共有 56 个离子，相当于 8 个 $MeFe_2O_4$，其中 24 个金属离子，32 个氧离子。结构如图 2.3-55 所示。

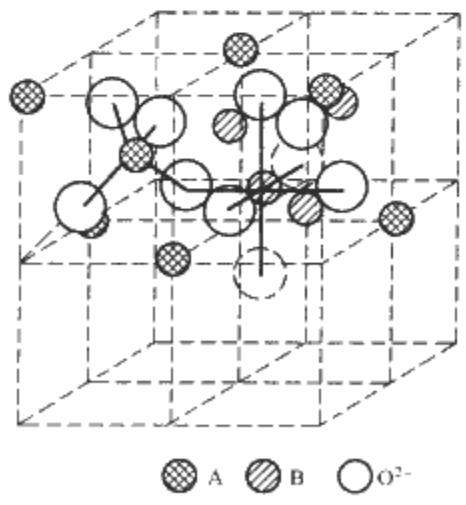


图 2.3-55 尖晶石单元晶胞的两个 1/8 结构

A—离子占据；O^{2-}—围成的四面体；B—离子占据八面体

5.1 锰锌铁氧体

5.1.1 分子式、典型成分

锰锌铁氧体标准分子式：$Mn_xZn_{(1-x)}Fe_2O_4$，$0<x<1$。由于 x 不同，材料组分变化，致使性能随之改变，可制成高磁导率材料，也可以制成功率材料或其他类型材料。对于生产者来说，可以通过调整配方，主要是 x 值相应调整，加上辅以工艺的配合，可以生产出满足不同要求的锰锌铁氧体材料。表 2.3-125 和表 2.3-126 给出了由于组分的变化引起磁性和应用的变化。

5.1.2 生产工艺流程

锰锌铁氧体生产工艺分干法（也称氧化物法）和共沉淀法两种，目前生产仍以氧化物法为主，共沉淀法在某些工厂用来生产一些特殊要求的产品。图 2.3-56 和图 2.3-57 为两种工艺流程图。共沉淀法是制备高质量铁氧体材料的重要工艺，它的含义是：用化学反应将溶液中金属离子共同沉淀下来，通常是将金属盐类按比例配好，在溶液状态中均匀混合，再用强碱如：NaOH、NH_4OH 或草酸铵作沉淀剂，将所需的多种金属离子共同沉淀下来。这种方法的优点是：在离子状态下进行混合，比机械混合法更均匀，减少有害杂质引入的机会，容易精确控制化学计量，颗粒度也可以由反应条件来控制，粒度分布窄，化学活泼性好，因而可以在较低烧结温度下进行充分的固相反应，获得较佳的显微结构。缺点是：常呈现分层沉淀，致使沉淀物偏离原配方，成本高于氧化物法。

表 2.3-125 锰锌铁氧体的一些配方（摩尔质量比）

型 号	Fe_2O_3	MnO	ZnO	加杂
MnZn—2000①	53.0	28.0	19.0	0.14%（质量分数）CoO 或 0.2%(质量分数)$CaCO_3$
MnZn—4000	52.0	27.0	21.0	
MnZn—6000	52.0	25.0	23.0	
MnZn—10000	51.0	24.0	25.0	

① MnZn—2000，指 $\mu_i \approx 2000$ 左右，余类推。

表 2.3-126 软磁铁氧体按主要用途的分类

分类 / 用途 / 性能	Ⅰ 低频变压器	Ⅱ 中频电感器 天线棒	Ⅲ 宽频带脉冲 变压器	Ⅳ 高磁通 密度下使用	Ⅴ 高频电感器 功率变压器
μ_i	800～2500	500～1000	1500～10 000	1000～3000	70～150
$\tan\delta/\mu_i$ (10^{-6})	0.8～1.8 (10kHz)	5～10 (100kHz)	1～10 (10kHz)		20～50 (1MHz)
	1.5～10 (10kHz)	10～40 (1MHz)	4～60 (100kHz)		60～120 (10MHz)
B_s (Gs)	3500～5000	～400	3000～5000	3500～5200	3500～4200
T_c (居里溫度) (℃)	140～210	200～280	90～280	180～280	350～490
ρ (电阻率) ($\Omega\cdot$cm)	50～700	100～2000	2～50	20～100	$>10^5$
近似成分 (%，摩尔分数)	MnO 27 ZnO 20 Fe_2O_3 53	MnO 34 ZnO 14 Fe_2O_3 52	MnO 27 ZnO 20 Fe_2O_3 53	MnO 30 ZnO 15 Fe_2O_3 55	NiO 32 ZnO 18 Fe_2O_3 50
使用频率 (kHz)	≤200	200－2000	≤100000	700～1000	

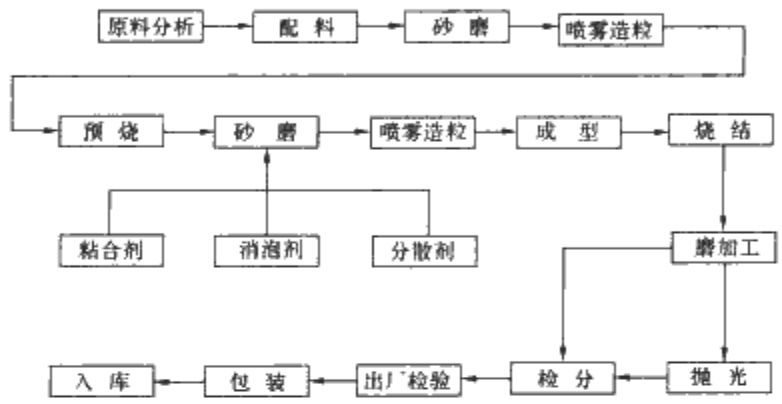


图 2.3-56 锰锌铁氧体干法生产工艺流程图

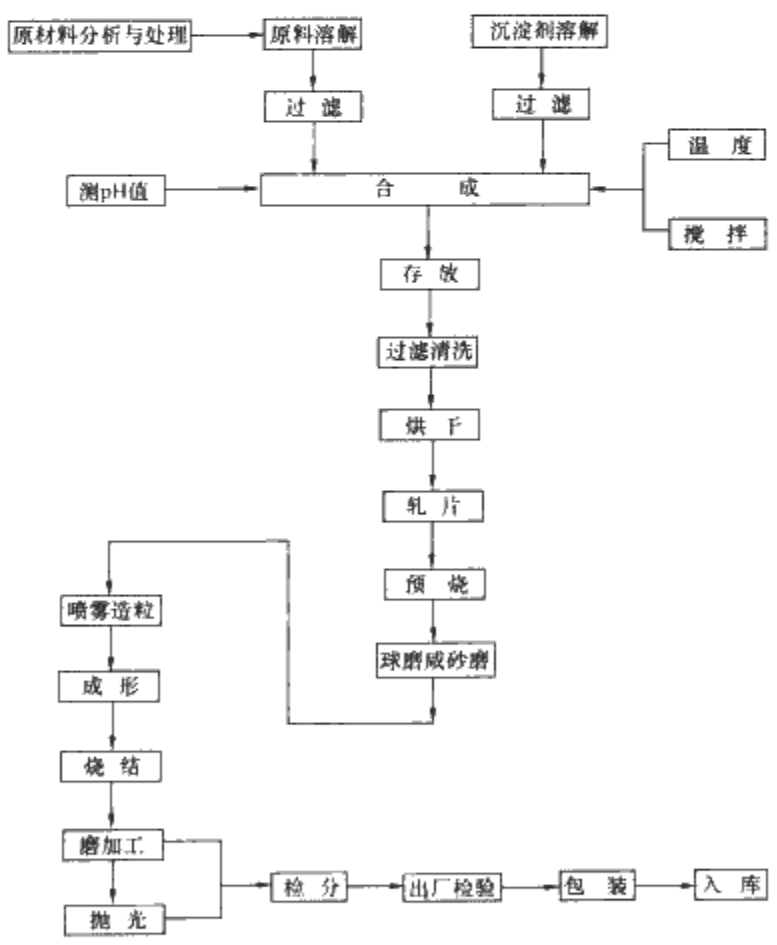


图 2.3-57 锰锌铁氧体共沉法工艺流程图

5.1.3 锰锌铁氧体分类及其应用范围

锰锌铁氧体的主要特性是：高 μ_i（起始磁导率）、高 Q（品质因数）、B_s（饱和磁通）、低 α_μ（磁导率温度系数）、低 D（磁导率减落），其应用的频率范围是 1kHz～3MHz，表 2.3-126 给出了软磁铁氧体按主要用途的分类。表中Ⅰ—Ⅳ类是锰锌铁氧体大致分类法，比较粗糙。随着 MnZn 材料性能的提高，应用范围不断扩大，制定新的分类原则，以满足各领域的正确选用此材料是当务之急，因此近些年从国际电工委员会（IEC）和我国技术监督部门、行业协会都颁布了软磁材料的分类标准，如：IEC 颁布的 IEC 61332 Ed2：软磁铁氧体材料分类（Soft ferrite material classification）标准，此标准规定了主要类别与子系列（小类）划分的原则。标准中将软磁铁氧体分成 3 大类，每大类又分成若干小类：IS 类中有 17 个小类、SP 类中有 13 个小类、WP 类中有 26 小类。

5.2 镍锌铁氧体

5.2.1 分子式、典型组成、应用领域

镍锌铁氧体分子式为 $Ni_xZn_{(1-x)}Fe_2O_4$，$0<x<1$。根据产品性能的要求，x 值可以进行调整，以具有适用使用要求的性能。表 2.3-127 为镍锌铁氧体的组成成分情况。

表 2.3-127 镍锌铁氧体的一些配方（重量比）

组成（重量比）	μ_i	μ_m	频率范围	T_c(℃)
Fe_2O_3 (67.9) NiO (10) ZnO (19) CuO (3.1)	852	4300	1～1000kHz	150
Fe_2O_3 (75.1) NiO (9.1) ZnO (13.8) Co_2O_3 (2.0)	125	400	0.5～10MHz	350
Fe_2O_3 (73.1) NiO (18.2) ZnO (8.6) Co_2O_3 (1.1)	40	115	10～50MHz	450
Fe_2O_3 (71.4) NiO (28.3) ZnO (0.3)	14	42	50～220MHz	330

镍锌铁氧体具有优良的高频特性，在 1MHz 以上，其性能优于锰锌铁氧体，加上又具有高的电阻率，在 1～300MHz 范围内被广泛地应用于抗高频电磁干扰（EMI）、计算机系统、通信系统、汽车系统、照明系统、办公自动化系统、自动控制及其他开关电源，适用于各种电感器、扼流圈、滤波线圈、DC-DC 变换器。特别是随着电子产品向高频、高速、高组装密度发展（SMT），它在新的技术领域中应用越来越广泛。

5.2.2 Ni—Zn 软磁铁氧体生产工艺流程

Ni—Zn 软磁铁氧体生产工艺流程如图 2.3-58 所示。

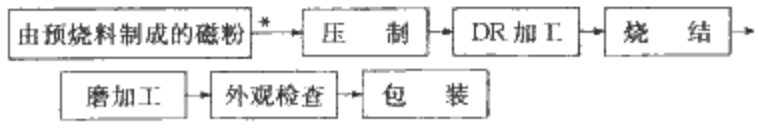


图 2.3-58 镍锌铁氧体干法生产工艺流程图

* Ni—Zn 磁粉可以外购，也可以自行烧结、制粉（参见 MnZn 铁氧体工艺流程前半部分）。

5.2.3 Ni—Zn 铁氧体分类及其应用

Ni—Zn 铁氧体的应用范围与本章 5.1.2 节表 2.3-126 中Ⅴ类 Mn—Zn 铁氧体大致相同。

随着 Ni—Zn 铁氧体材料性能的提高，在许多领域都得到应用，市场上产品种类日益增多。软磁铁氧体材料分类已不能完全包括市场产品的更细致的分类，以国内较大的某软磁材料生产公司的产品分类为参考，列出其分类和应用范围，见表 2.3-128。

表 2.3-128 某公司镍锌铁氧体分类及应用范围

材料系列	产品牌号	应 用 范 围
抗热冲击材料	TN20H、TN25H、TN30H、TN40H、TN65H	功率电表、扼流线圈、DC—DC 转换器、变压线圈、表面贴装电感
高饱和磁通材料	TN12B、TN45N、TN50B、TN65B、TN85B	功率电感、扼流圈、DC—DC 转换器、变压器线圈、表面贴装电感
通用 N 系材料	TN12N、TN32N、TN40N、TN70N	功率电感、抗 EMI 滤波器及其他电感
高起始磁导率材料	TN100B、TN150B、TN200B	抑制不同模式噪声电感器
高品质因数材料	TN10Q、TN20Q、TN30Q	数字电路中抑制高频干扰信号电感器
低损耗材料	TN40L、TN80L、TN120N	功率电感、扼流圈，适合小尺寸转换变压器及其他类型变压器
牌号用字母、数字说明	T：公司名称、N：NiZn 铁氧体、20：代表十分之一的起始磁导率，20 即为 $\mu_i=200$，后缀字母：H：抗热冲击，L：低耗损，Q：高品质因数	

5.2.4 NiCuZn 软磁铁氧体

笔记本电脑在高速度、高存储密度、薄轻化等方面日益进步，以手机为中心的移动通讯技术和有线、无线数字通讯网不断更新换代，促使电子产品向着小型化、便携化方向发展，带动了模拟电路向高速数字电路的变革及表面安装技术（SMT）的崛起。由于 SMT 对传统插装技术的替代，电子元件实现了片式化，并继续向小型化、高性能、多功能、高可靠性方向发展。1980 年由低温共烧铁氧体（LTCF）技术用流延工艺制备的叠层片式电感问世，使电感元件小型化有了迅速发展。叠层片式电感的结构是由交互叠加的铁氧体层和内导电层所组成，用低温共烧铁氧体技术制成。低温烧结铁氧体粉是制造叠片式电感的关键材料，这种材料需具有以下特点：

（1）烧结温度低，在 900℃以下（一般 870℃）的共烧温度下完全致密化。

（2）电阻率高，符合在铁氧体上直接印刷 Ag 导体的要求。

（3）电磁性能（如 μ_i、$\tan\delta$、T_c 等）良好。

（4）共烧时不与 Ag 发生化学反应。

（5）粒度细（小于 1μm）且均匀。

NiCuZn 铁氧体，可以满足上述要求，是当前叠片式电感普遍选用的低温烧结铁氧体材料。

国内生产的 NiCuZn 软磁磁粉是用氧化物法生产的，μ_i：800±10%（880℃±15℃），Q：125，温度系数 α：（3～6）$\times10^{-6}$/℃。由于这种材料国内刚刚生产，需求量大，有许多单位开展研究，目前实验室水平由表 2.3-129 给出。其中 Sol-Gel（溶胶凝胶法）和 Sol-Gel 自蔓延法是属于软化学法，虽然与氧化物法相比可提高 μ_i，但由于成本高，有环保问题，尚没有投入到生产中去。

由于 NiCuZn 铁氧体的磁致伸缩系数大，存在 μ_i 对应力敏感问题，在内导体的应力作用下或在表面安装过程中吸嘴压力作用下，片式元件性能会恶化，现又开展对较 NiCuZn 的 λ_s 低的 MgCuZn 材料的研究，由于应有敏感性的改善，这种材料将会有新的发展，见表 2.3-130。

表 2.3-129 国内低烧 NiCuZn 铁氧体的实验室研究水平

单位	烧结温度 T_s（℃）	起始磁导率 μ_i	温度系数 α/(10^{-6}℃)	居里温度 T_c（℃）	Q 值	助溶剂及其添加量	制造方法
西磁	870±10	325±5%	<1	≥130	>145	Bi_2O_3 0.25%②	氧化物
成电	900	840	—	—	>65	Bi_2O_3 0.3%① + MoO_3 0.15～0.2%①	氧化物
风华	880±15	800±10%	3～6	—	125	Bi_2O_3 1.0～1.2%②	氧化物
西磁	880±20	>1000	<1	≥125	>60	Bi_2O_3 0.25%②	Sol—Gel
清华	880±20	900	—	—	>5	—	Sol—Gel 自蔓延燃烧

① 质量分数。

② 摩尔分数。

表 2.3-130 低损耗 NiCuNz 系列材料指标

	磁导率	损耗（mW/cm³）	饱和磁通密度（mT）	居里温度（℃）	密度（g/cm³）
	（25℃）	（50kHz，150mT，100℃）	（25℃，1600A/m）		
TN40L	400±25%	450	420	230	5.0
TN80L	800±25%	300	390	180	5.0
TN120L	1200±25%	250	350	150	5.0

5.3 主要软磁铁氧体生产公司的锰镍铁氧体、镍锌铁氧体产品性能介绍

（1）浙江海宁天通电子股份有限公司的主要产品见表 2.3-131、表 2.3-132、表 2.3-133、表 2.3-134（锰锌铁氧体）、表 2.3-135（镍锌铁氧体）。

表 2.3-131 MnZn 功率铁氧体材料特性

特 性		单位	TP1	TP4	TP4A	TPS	TK
初始磁导率 μ_i			3800±25%	2300±25%	2400±25%	1400±25%	3000±25%
振幅磁导率 μ_a			—	3000min	3000min	—	—
饱和磁通密度（H=1194A/m）	25℃	mT	480	510	510	470①	470
	100℃	mT	340	390	390	380	370

续表

特性			单位	TP1	TP4	TP4A	TP5	TK
剩磁 B_r		25℃	mT	180	100	110	140	120
		100℃	mT	—	55	60	98	85
矫顽力 H_c		25℃	A/m	16	14	13	36.5	12
		100℃	A/m	—	9	6.5	27.2	7.0
功率损耗 P_{cv}	25kHz 200mT 正弦波	25℃	kW/m³	150	—	—	—	168
		100℃	kW/m³	180	—	—	—	154
	100kHz 200mT 正弦波	25℃	kW/m³	—	600	600	130②	—
		100℃	kW/m³	—	410	300	80②	—
		120℃	kW/m³	—	500	380	—	—
电阻率 ρ			Ω·m	0.4	6.5	6.5	—	—
居里温度 T_c			℃	190	220	215	240	190
密度 d			kg/m³	4.85×10^3	4.8×10^3	4.8×10^3	4.8×10^3	4.8×10^3

注 各表格所列之值为典型值，不包括客户的特殊要求；有特殊要求时，应在订货合同或协议中给予明确。

① 测试磁场 1600A/m。

② 500kHz，50mT。

表 2.3-132 MnZn 功率铁氧体材料特性

特性		单位	TF	TF1	TF2	TF3	TD
初始磁导率 μ_i			2000±25%	1800±25%	2300±25%	2300±25%	5500±25%
振幅磁导率 μ_a			≥3000	≥3000	≥3000	≥3000	—
饱和磁通密度 (H=1194A/m)	25℃	mT	500	510	480	500	500
	100℃	mT	390	410	360	380	380
剩磁 B_r	25℃	mT	120	170	130	130	95
	100℃	mT	85	—	—	—	55
矫顽力 H_c	25℃	A/m	12	11	16	14	7.0
	100℃	A/m	7	—	—	—	5.8
功率损耗 P_{cv} 16kHz 150mT	25℃	AW/g	11.0	—	—	—	—
	100℃	AW/g	9.0	4.2	3.5	3.0	—
64kHz 200mT	100℃	AW/g	—	5.8	55	40	—
100kHz 200mT	25℃	AW/g	—	—	—	—	115
	120℃	AW/g	—	110	100	90	208
电阻率 ρ		Ω·m	6	3	5	3	6
居里温度 T_c		℃	220	200	200	200	210
密度 d		kg/m³	4.8×10^3	4.8×10^3	4.8×10^3	4.8×10^3	4.8×10^3

注 各表格所列之值均为典型值，不包括客户的特殊要求；有特殊要求时，应在订货合同或协议中给予明确。

表 2.3-133 MnZn 功率铁氧体材料特性

特性	单位	TL5	TL7	TL10	TL13	TL15	TD5A
初始磁导率 μ_i		5000±30%	7000±30%	10 000±30%	1300±30%	15 000±30%	5000±25%
初始磁导率比温度系数 $\alpha_{\mu im}$ (20~60℃)	10^{-6}℃$^{-1}$	−0.5~2.0	−0.5~2.0	−0.5~1.5	−0.5~3.0	−0.5~2.0	—
比损耗因子 tanδ (10kHz)	10^{-6}℃$^{-1}$	<6.5	<6.5	<7.0	<7.0	<7.0	<10 (100kHz)
减落因子 D_F (1~10min)	10^{-6}	<3.0	<2.5	<2.0	<2.0	<2.0	<2.5
饱和磁通密度 B_s (H=1194A/m, 25℃)	mT	420	420	400	360	360	500 (25℃) 400 (100℃)

续表

特 性	单 位	TL5	TL7	TL10	TL13	TL15	TD5A
剩 磁 B_r	mT	140	100	90	100	100	—
矫顽力 H_c	A/m	8	7.5	7.2	4.4	4.4	—
电阻率 ρ	Ω·m	1	0.3	0.15	0.15	0.15	1.00
居里温度 T_c	℃	150	125	120	115	110	≥185
密 度 d	kg/m³	4.8×10^3	4.9×10^3	4.9×10^3	4.95×10^3	4.95×10^3	4.80×10^3

注 各表格所列之值均为典型值，不包括客户的特殊要求；有特殊要求时，应在订货合同或协议中给予明确。

表 2.3-134 MnZn 抗电磁干扰、低温度系数、宽温度磁导率铁氧体材料特性

特 性	单位	TS5	TS7	TS10	TG	TW	THz
初始磁导率 μ_i		5000±30%	7500±30% 2000min，500kHz	10 000±30%	5000±30%	25℃ 12 000±30% −29℃，≥9000	2300±25%
初始磁导率比温度系数 $\alpha_{\mu ir}$	$\times10^{-6}$℃$^{-1}$	−0.5～2.0 (20～60℃)	−0.5～2.0 (20～60℃)	−0.5～2.0 (20～60℃)	0～20℃±12.5% 20～70℃±12.5%		0.3～1.5 (25～55℃) 0.2～2.0 (5～25℃)
比损耗因子 tanδ (10kHz)	$\times10^{-6}$℃$^{-1}$	10 (100kHz)	30 (100kHz)	30 (100kHz)	<3.5 (10kHz)	<8.0 (10kHz)	<2.7 (10kHz) <4.2 (10kHz)
减落因子 D_F (1～10min)	$\times10^{-6}$	<3.0	<2.5	<2.0	<3.0	<3.0	—
饱和磁通密度 B_s (H=1194A/m，25℃)	mT	410	410	380	400	380	430 (25℃) 320 (100℃)
剩 磁 B_r	mT	70	80	120	65	100	65 (25℃) 60 (100℃)
矫顽力 H_c	A/m	6.0	6.0	5.0	7.2	4.4	26 (25℃) 19 (100℃)
电阻率 ρ	Ω·m	1.0	0.2	0.2	0.15	0.15	3
居里温度 T_c	℃	150	125	120	140	110	≥180
密度 d	kg/m³	4.8×10^3	4.85×10^3	4.9×10^3	4.8×10^3	4.9×10^3	4.7×10^3

注 各表格所列之值均为典型值，不包括客户的特殊要求；有特殊要求时，应在订货合同或协议中给予明确。

表 2.3-135 镍锌铁氧体产品性能

材 质	μ_i	B_s		$\tan\delta/\mu_i$		T_c	D	$\alpha_{\mu ir}$
		mT	kA/m	$\times10^{-6}$	MHz	℃	g/cm³	$\times10^{-6}$
TN220B	2200±25%	270	4.0	10	0.01	>90	5.1	3
TN200B	2000±25%	290	4.0	10	0.01	>100	5.1	2
TN150B	1500±25%	300	4.0	10	0.01	>110	5.1	2
TN120B	1200±25%	310	4.0	10	0.05	>120	5	6
TN100B	1000±25%	320	4.0	10	0.05	>130	5	5
TN85B	850±25%	320	4.0	15	0.01	>145	5	8
TN65B	60±25%	400	4.0	17	0.1	>190	5	18
TN45B	450±25%	440	4.0	25	0.1	>260	5	1
TN25B	250±25%	410	4.0	35	0.1	>280	5.1	27
TN12B	100±25%	430	4.0	65	0.1	>230	5	22
TN90H	900±25%	340	4.0	20	0.1	>140	5.1	15
TN65H	650±25%	400	4.0	15	0.1	>185	5	8
TN45H	450±25%	400	4.0	25	0.1	>200	5	25

续表

材质	μ_i	B_s		$\tan\delta/\mu_i$		T_c	D	$\alpha_{\mu ir}$
		mT	kA/m	$\times10^{-6}$	MHz	℃	g/cm³	$\times10^{-6}$
TN40H	400±25%	410	4.0	25	0.1	>250	5.1	25
TN25H	20±25%	420	4.0	30	0.5	>300	5.1	30
TN80N	800±25%	280	4.0	20	0.1	>120	4.8	16
TN60N	600±25%	340	4.0	25	0.1	>160	4.8	15
TN35N	350±25%	340	4.0	50	0.5	>160	4.9	25
TN12N	120±25%	340	4.0	65	1.0	>300	4.8	28
TN4N	40±25%	260	4.0	370	40	>300	4.7	45
TN1N	10±25%	340	4.0	570	120	>300	5.0	42
TN160L	1600±25%	320	4.0	13	0.1	>140	5.0	6
TN120L	1200±25%	360	4.0	10	0.1	>160	5.0	7
TN80L	800±25%	410	4.0	13	0.1	>190	4.9	9
TN40L	400±25%	460	4.0	20	0.1	>230	4.9	12
TN30L	300±25%	475	4.0	25	0.1	>240	4.9	14
TN45M	450±25%	320	4.0	290	0.1	>140	4.9	15
TN25M	250±25%	280	4.0		0.1	>170	4.8	35

(2) 浙江横店集团东磁股份有限公司的主要产品见表 2.3-136、表2.3-137、表2.3-138、表2.3-139（镍锌铁氧体）。

表 2.3-136 MnZn 功率铁氧体材料特性

特性		DMR17	DMR30	DMR30d	DMR40	DMR44	DMR50	R3K
初始磁导率 μ_i		1700±25%	2500±25%	2300±25%	2300±25%	2400±25%	1400±20%	3000±20%
振幅磁导率 μ_a (f=25kHz B=200mT)		—	>3200	>3200	>3200	—	—	—
饱和磁感应强度 (H=1194A/m f=50Hz) B_s (mT)	25℃	470	510	510	510	510	470	490
	100℃	380	390	420	390	400	380	370
剩磁 B_r (mT)	25℃	210	127	130	95	130	140	127
	100℃	90	95	95	55	60	98	95
矫顽力 H_c (A/m)	25℃	19.5	14	14	14	15	36.5	14
	100℃	10	8	8	9	6.0	27.288 8	8
功率损耗 P_v (AW/cm³)	25℃	220①	130①	130①	600②	600②	130	165①
	60℃	140①	—	—	450①	400②	80③	150①
	100℃	100①	100①	90①	410①	300①	80②	150①
	120℃	—	—	—	500②	380②	—	—
居里温度 T_c (℃)		>240	>230	>230	>215	>215	>240	>205
电阻率 ρ (Ω·m)		3	10	6.5	6.5	2	—	10
密度 d(g/cm³)		4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8

① 测试条件（Testing Conditions）25kHz，200mT。

② 测试条件（Testing Conditions）100kHz，200mT。

③ 测试条件（Testing Conditions）500kHz，200mT。

以上数据是根据标准样环 φ25×φ15×8 获得的典型数据，有关产品的具体性能会在此基础上有所调整。

表 2.3-137 MnZn 高磁导率铁氧体材料特性

特性	单位	R4K	R5K	R7K	R10K	R12K	R15K
初始磁导率 μ_i		4300±25%	5000±25%	7000±25%	10 000±30%	12 000±30%	15 000±30%
比损耗因子 $\tan\delta_{\mu i}$ (10kHz)	$\times10^{-6}$	<10.0 (100kHz)	<15.0 (100kHz)	<30.0 (100kHz)	<7.0	<7.0	<7.0
饱和磁通密度 B_s (H=1194A/m)	mT	450	430	420	400	380	360

续表

特　性	单位	R4K	R5K	R7K	R10K	R12K	R15K
剩磁 B_r	mT	140	140	110	100	100	100
矫顽力 H_c	A/m	8.0	8.0	7.0	6.5	6.0	3.2
比温度系数 $\alpha_{\mu r}$ (20～60℃) Relative	$\times10^{-6}$/℃	−0.5～2.0	−0.5～2.0	−0.5～2.0	−0.5～2.0	−0.5～2.0	−0.5～2.0
比磁滞损耗系数 η_B 25℃，10kHz；1.5～3mT	10^{-6}/mT		<1	<1.2	<1.4	<1.5	<2.0
居里温度 T_c	℃	>150	>140	>125	>120	>110	>110
电阻率 ρ	Ω·m	1.0	0.5	0.2	0.15	0.15	0.05
密度 d	g/cm³	4.85	4.85	4.9	4.9	4.9	4.9

注　以上数据是根据标准样环 $\phi25\times\phi15\times8$ 获得的典型数据，有关产品的具体性能会在此基础上有所调整。

表 2.3-138　　MnZn 高磁导率铁氧体材料特性

特　性	温度（℃）	测试条件	单　位	DMR71^{new}
初始磁导率 μ_i	25	10kHz/0.25mT		3800±25%
比损耗因子 $\tan\delta_{\mu i}$	25	10kHz/0.25mT	[10^{-6}]	≈1
	25	10kHz/0.25mT	[10^{-6}]	≈2
饱和磁通密度 B_s max	25	50 kHz/0.25mT	[mT]	550
	100	50Hz/1194A/m	[mT]	435
矫顽力 H_c	25	50Hz/1194A/m	[A/m]	12
	100	50Hz/1194A/m	[A/m]	15
比温度系数 $\alpha_{\mu r}$	5～55	10kHz/0.25mT	[10^{-6}/℃]	≈4.4
	25～55	10kHz/0.25mT	[10^{-6}/℃]	≈−2.2
比磁滞损耗系数 η_B	25	10kHz/（1.5～3.0）mT	[10^{-6}/mT]	<0.3
居里温度 T_c		10kHz/0.25mT	[10^{-6}/℃]	≥255
密度 d	25		[g/cm³]	4.85

注　以上数据是根据标准样环 $\phi25\times\phi15\times8$ 获得的典型数据，有关产品的具体性能会在此基础上有所调整。

表 2.3-139-1　　镍锌铁氧体材料特性

材　料	DN5H	DN8H	DN10H	DN25H	DN30B	DN35H	DN40B
初始磁导率 μ_i	50±25%	80±25%	100±25%	250±25%	300±25%	350±25%	400±25%
工作频率 f（MHz）	0.5～55	0.5～15	0.4～20	0.1～4	0.05～3	0.1～2	0.05～2
比损耗因子 $-\tan\delta_{\mu i}$	250 (30MHz)	230 (15MHz)	130 (1MHz)	60 (1MHz)	100 (0.1MHz)	45 (1MHz)	35 (1MHz)
饱和磁通密度 B_s（mT）	370 (4000A/m)	360 (4000A/m)	370 (4000A/m)	410 (4000A/m)	480 (4000A/m)	430 (4000A/m)	460 (4000A/m)
剩磁 B_r（mT）	280	235	250	230	280	240	230
矫顽力 H_c（A/m）	300	476	120	76	65	55	40
比温度系数 $\alpha_{\mu r}$（$\times10^{-6}$℃）（20～60℃）	15～50	25～50	25～50	10～25	15～40	8～25	15～30
居里温度 T_c（℃）	>300	>250	>250	>230	>260	>230	>240
电阻率 ρ（Ω·m）	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$
密度 d（g/cm³）	5.1	5	5	5.1	5.2	5.2	5.2
特　点	低 μ_i，高 Q			高 B_s			

注　以上数据是根据标准样环 $\phi25\times\phi15\times8$ 获得的典型数据，有关产品的具体性能会在此基础上有所调整。

表 2.3-139-2 镍锌铁氧体材料特性

材 料	DN50B	DN65H	DN80H	DN85H	DN100B	DN150H	DN200
初始磁导率 μ_i	500±25%	650±25%	800±25%	850±25%	1000±25%	1500±25%	2000±25%
工作频率 f（MHz）	0.05～55	0.1～1.5	0.1～1.5	0.1～1.5	0.5～1.0	0.01～0.5	0.001～0.5
比损耗因子 $\tan\delta_{\mu i}$	15 (0.1MHz)	20 (0.1MHz)	15 (0.1MHz)	16 (0.1MHz)	15 (0.1MHz)	16 (0.1MHz)	20 (0.1MHz)
饱和磁通密度 B_s（mT）	440 (4000A/m)	330 (1600A/m)	380 (4000A/m)	350 (1600A/m)	330 (1600A/m)	310 (1600A/m)	290 (1600A/m)
剩磁 B_r（mT）	300	150	260	200	130	180	200
矫顽力 H_c（A/m）	30	35	20	20	28	20	10
比温度系数 $\alpha_{\mu T}$（$\times10^{-6}$/℃）（20～60℃）	15～35	2～8	7～20	5～20	5～20	1～6	2～8
居里温度 T_c（℃）	>220	>150	>180	>140	>130	>100	>100
电阻率 ρ（Ω·m）	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^5$
密度 d（g/cm³）	5.2	5.1	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1
特 点	高 B_s	低温度系数	高 B_s	高频（EMI）			

注 以上数据是根据标准样环 $\phi25\times\phi15\times8$ 获得的典型数据，有关产品的具体性能会在此基础上有所调整。

6 非晶及纳米晶软磁材料

非晶纳米晶合金是20世纪80年代发展起来的新一代软磁材料，这种材料的原子排列具有长程无序的特点，因而具有一些特殊的性质。目前从实用角度对非晶纳米晶材料开发最多的是利用它们优异的软磁性能制造各种磁性元器件和利用其高强韧性的特点制造结构件，其中非晶纳米晶合金作为软磁材料已经得到了广泛应用并实现了产业化。本节将重点介绍非晶纳米晶合金在电力和电子领域作为磁性元器件的主要应用。

6.1 铁基非晶合金

6.1.1 铁基非晶合金的性能特点

铁基非晶合金的典型牌号是1K101（$Fe_{78}Si_9B_{13}$，原子百分比），在所有常用的非晶合金中具有最高的饱和磁感应强度，磁导率大大高于硅钢片，而矫顽力及铁损显著低于硅钢片，如表2.3-140所列。表2.3-140对比了铁基非晶合金和硅钢片的磁性能，铁基非晶合金代替硅钢片，作为中低频（50Hz～20kHz）变压器和电感元器件的铁心材料，有以下优点：

（1）高饱和磁感应强度—提高铁心的工作磁感，缩小体积。

（2）高磁导率低矫顽力—减小变压器一次绕组的励磁电流。

（3）低损耗—降低器件的温升。

表 2.3-140 铁基非晶合金和硅钢片的磁性能对比

性能指标	铁基非晶合金1K101	冷轧硅钢
饱和磁感应强度（T）	1.56	2.03
矫顽力（A/m）	<4	<30
最大磁导率	45×10^4	4×10^4
铁损（W/kg）	<0.2（50Hz，1.3T）	<1.2（50Hz，1.7T）
励磁功率（VA/kg）	<0.5（50Hz，1.3T）	<0.83（50Hz，1.7T）
叠片系数（%）	>0.80	0.95

续表

性能指标	铁基非晶合金1K101	冷轧硅钢
磁致伸缩系数（$\times10^{-6}$）	27	—
电阻率（μΩ·cm）	130	0.45
密度（g/cm³）	7.18	7.65
居里温度（℃）	415	746
晶化温度（℃）	550	—
维氏硬度 HV	900	181
厚度（mm）	0.03	0.3

6.1.2 铁基非晶合金在电力领域的应用

铁基非晶合金的铁损仅相当于硅钢片的1/3～1/5，导磁率比硅钢片高出近一个数量级。用非晶合金铁心制造的配电变压器空载损耗比硅钢S9系列变压器下降75%，空载电流比S9变压器下降50%，负载损耗比S9和S7变压器下降25%。图2.3-59和表2.3-141分别是铁基非晶配电变压器铁心在工频下的铁损和励磁功率及非晶变压器SBH16与硅钢变压器S9的损耗及节能效果对比。

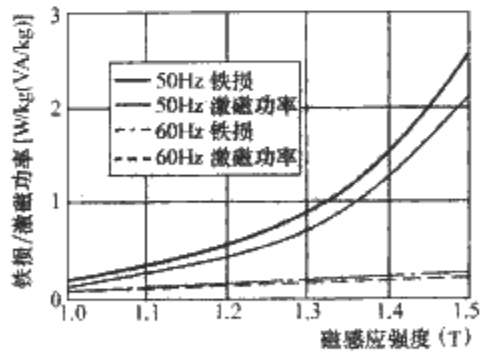


图 2.3-59 铁基非晶合金的铁损与频率及工作磁感的关系

表 2.3-141 非晶变压器SBH16与硅钢变压器S9的损耗及节能效果对比

容量（kVA）	产品系列	空载损耗（W）	负载损耗（W）	年运行能耗（kW·h）	年节约能耗（kW·h）
200	SBH16	90	2600	5313	4818
	S9	480	2600	10 131	—
500	SBH16	190	5150	11 089	9373
	S9	960	5150	20 462	—

在配电变压器铁心设计中，非晶铁心的工作磁感常取 1.3～1.4T，低于硅钢片的 1.6～1.7T，因此非晶铁心配电变压器的体积比硅钢片铁心稍大。

出于设计和产量等原因，目前非晶合金变压器的价格高于硅钢变压器，但考虑到非晶合金变压器运行过程中的空载损失远低于硅钢变压器，整体成本是降低的。这种情况尤其适用于空载时间长、用电效率低的农村电网。为了准确计算非晶变压器的节能效益，引入总拥有成本（TOC）的概念：

TOC＝变压器购买成本＋使用成本

虽然非晶合金变压器的购买成本较高，但考虑到非晶合金变压器具有低的铁损，在变压器运行一定时间后，由于较低的空载损耗形成的节电效益即可大于硅钢变压器的购买差价。同时，非晶配电变压器的节能也十分有利于环保。

6.1.3 铁基非晶合金在电力电子领域的应用

(1) 中频变压器铁心。铁基非晶合金不仅具有理想的工频磁性能，而且中频磁性同样优异，因此可以广泛用来代替硅钢片，制造各种中频电源变压器铁心，如 400Hz 航空电源、铁路信号控制系统电源、淬火电源等，工作频率可达 15kHz。对于不同频率的变压器，铁心的工作磁感也取相应不同的值，一般随着电源频率的提高适当降低铁心工作点。图 2.3-60 为中频变压器用铁基非晶铁心的损耗频率特性。

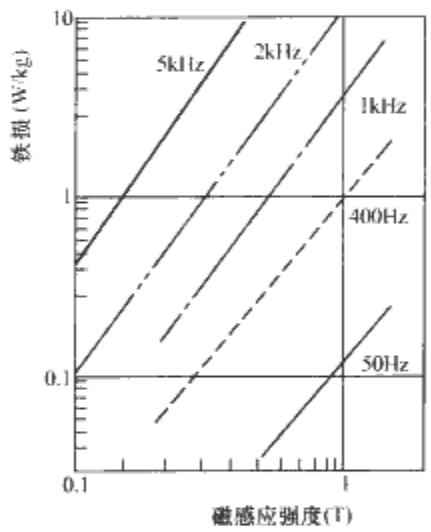


图 2.3-60 中频变压器用铁基非晶铁心的损耗频率特性

(2) 高频电感铁心。铁基非晶合金的高频铁损大大低于硅钢片，结合高的饱和磁感，是中高频大功率电源中滤波电抗器、高频滤波电感、功率因数校正电感铁心的理想材料。硅钢片的饱和磁感虽然高，但是由于高频铁损很大，为了避免发热过大只能采用更大的截面积。铁基非晶铁心目前已经应用于大功率电抗器铁心、大功率高频电源输出滤波电感铁心以及小功率电源输出电感铁心、汽车音响用电感铁心等。图 2.3-61 和图 2.3-62 为铁基非晶滤波电感及电抗器铁心的高频损耗特性。

6.2 铁基纳米晶合金

6.2.1 铁基纳米晶合金的性能特点

铁基纳米晶合金是在铁基非晶合金 FeSiB 的基础上，通过添加少量 Cu、Nb 等元素，经特殊的晶化热处理形成的。铁基纳米晶合金的出现大大拓展了原有非晶材料的应用领域，这源于它具有优良的综合磁性能优势。图 2.3-63 是不同软磁材料的饱和磁感和磁导率对比，图 2.3-64 是铁基纳米晶合金与铁氧体的温度特性对比，图 2.3-65 是铁基纳米晶合金的高频损耗，图 2.3-66 是铁基纳米晶合金与铁氧体的高频磁导率对比。

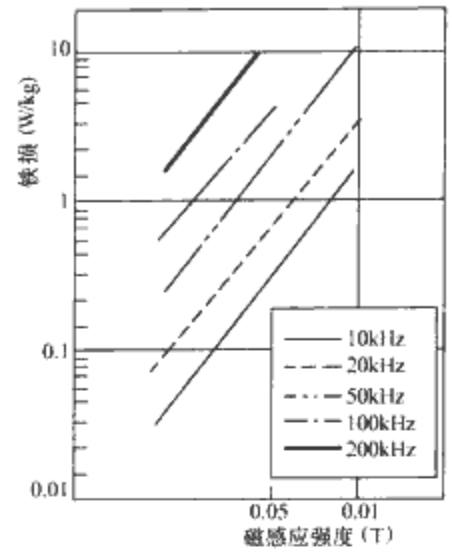


图 2.3-61 铁基非晶滤波电感铁心的高频损耗特性

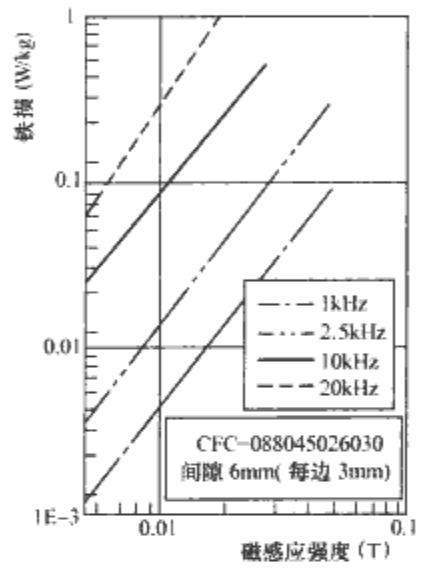


图 2.3-62 铁基非晶电抗器铁心的高频损耗特性

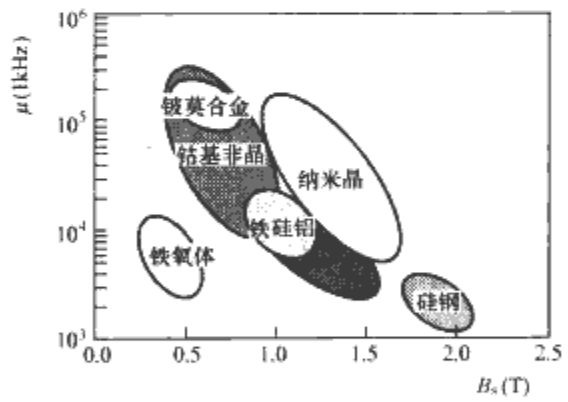


图 2.3-63 不同软磁材料的饱和磁感和磁导率对比

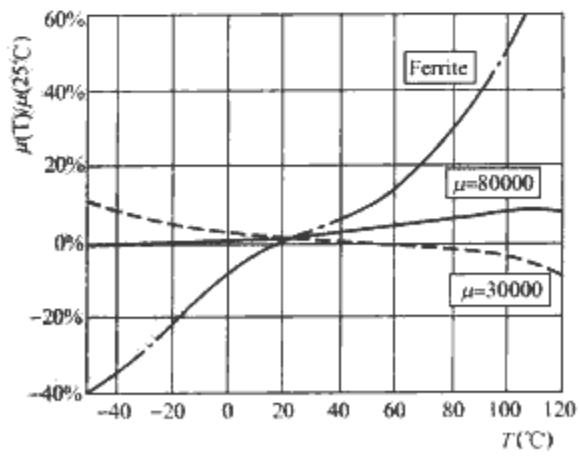


图 2.3-64 铁基纳米晶合金与铁氧体的温度特性对比

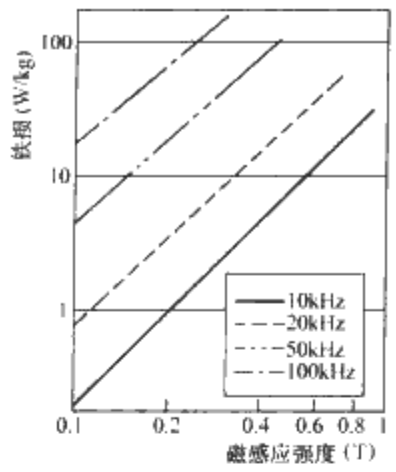


图 2.3-65 铁基纳米晶合金的高频损耗

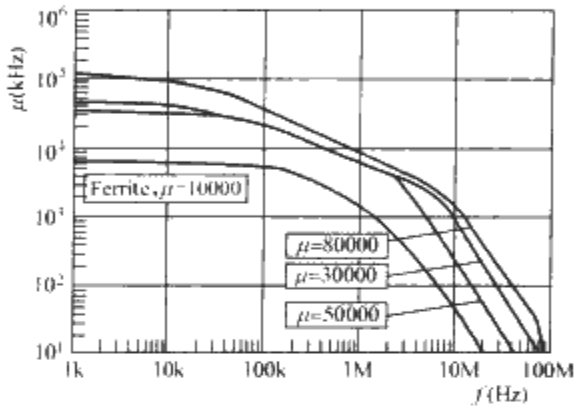


图 2.3-66 铁基纳米晶合金与铁氧体的高频磁导率对比

6.2.1.1 高磁导率和高饱和磁感的组合

在一般的软磁材料中，饱和磁感与磁导率基本上是相互矛盾的，例如坡莫合金具有很高的磁导率，但饱和磁感只有0.7～1.0T，而硅钢片的饱和磁感虽然接近2.0T，但磁导率很低。至于铁氧体，饱和磁感更是低于0.5T。

而铁基纳米晶合金同时具备高达10^5的初始磁导率和1.2T的饱和磁感，是目前综合磁性能最佳的软磁材料之一。较高的饱和磁感可以为元器件提供更高的工作磁感，缩小器件的体积，高磁导率又可以提高器件的灵敏度。

6.2.1.2 优良的温度特性

铁基纳米晶合金在－50～130℃的温度范围内，主要磁特性的变化率小于15%，而且变化规律基本上呈线性，这就大大改善了元器件的温度稳定性。

而传统的坡莫合金的温度特性比较复杂，不仅变化规律非线性，而且在室温以下存在磁特性的急剧变化，难以通过其他手段加以补偿。至于铁氧体，在－50～130℃温度范围内的磁性能变化已大于100%。

6.2.1.3 低铁损

铁基纳米晶合金的最大优势之一是具有很低的高频铁损，是目前金属软磁材料中的最佳材料，因而已经广泛应用于各种开关电源的高频功率变压器。

6.2.1.4 优异的频率特性

铁基纳米晶合金不仅在低频，而且在高频下同样拥有优异的磁性能。这一特点已经被应用于以共模电感为代表的高频磁性元器件。

6.2.1.5 优良的性价比

在传统的软磁材料中，铁氧体具有最低的价格，应用广泛，但具有许多不可避免的缺点。坡莫合金中含有贵金属镍，成本很高，近年来应用范围有萎缩趋势。而铁基纳米晶合金的磁性能可以与坡莫合金相比拟，而价格仅为坡莫合金的二分之一以下，无疑具有最佳的性价比。

6.2.2 铁基纳米晶合金在电力领域的应用

6.2.2.1 高压电流互感器铁心

在变电站使用大量的电力互感器，它们对铁心材料的要求非常苛刻，不仅要求高的磁性指标，而且要求铁心材料的整个磁化曲线满足一定的条件，以控制互感器的比差和角差，保证互感器在整个测量范围内的精度。近年来，非晶微晶合金作为互感器铁心的应用逐渐广泛起来，不仅价格大大低于坡莫合金，而且取得了非常理想的使用效果。图2.3-67是铁基纳米晶合金作为电流互感器铁心时与其他材料的磁性对比。

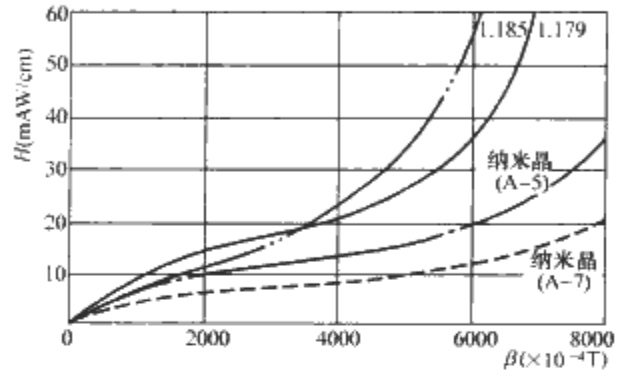


图 2.3-67 铁基纳米晶合金作为电流互感器铁心时与其他材料的磁性对比

6.2.2.2 电子式电能表互感器铁心

随着远程抄表等先进技术的发展，电子式电能表开始广泛应用于家用和工业电能表计费系统。一般要求电子式电能表所采用的互感器具有极低的比差和角差，以达到精密计量的目的。由于铁基纳米晶合金的高磁导率、低铁损，使得纳米晶铁心应用于电表互感器时具有最小的比差和角差。而且，纳米晶合金还可以根据某些特殊要求具有优良的抗直流偏磁特性，应用于存在直流分量的用户计费。图2.3-68是典型的纳米晶合金抗直流分量精密互感器的比差和角差曲线。

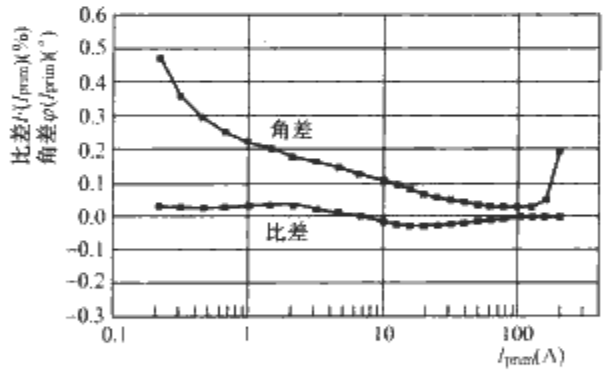


图 2.3-68 纳米晶合金抗直流分量精密互感器的比差和角差曲线

6.2.2.3 剩余电流动作断路器用互感器铁心

剩余电流动作断路器要求互感器铁心具有极高的磁导率。坡莫合金曾经是这种互感器的主要铁心材料，但是存在温度特性差、成本高等缺点。纳米晶合金的高初始磁导率恰好可以在这种互感器上得到应用。图2.3-69是剩余电流动作保护器互感器纳米晶铁心的磁滞回线。

另外，随着抗直流分量漏电断路器的应用，要求互感器铁心也具有良好的抗直流分量的能力。经过适当的热处理后，纳米晶合金可以具有极为不同的伏安特性和磁滞回线，在具有高磁导率的前提下拥有优良的抗直流偏磁能力，是抗直流分量（A型）剩余电流动作保护器的理想互感器铁心材料。

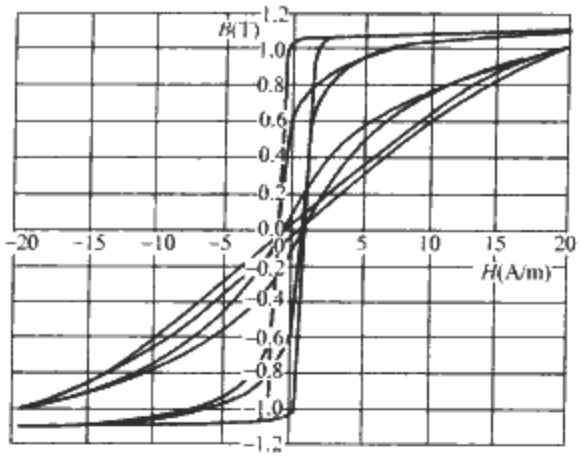


图 2.3-69 剩余电流动作保护器
互感器纳米晶铁心的磁滞回线

6.2.3 铁基纳米晶合金在电力电子领域的应用

6.2.3.1 高频功率变压器铁心

在非晶合金问世之前，开关电源变压器的铁心一般采用铁氧体或者坡莫合金。采用铁基纳米晶合金作为开关电源变压器铁心，可以克服其他材料的缺点，进一步提升变压器的效率。尤其在大功率开关电源中（例如逆变焊机），从前一般使用铁氧体铁心，由于铁心工作点低、温度特性差，电源性能不理想。铁基纳米晶铁心结合逆变技术的应用，使得变压器工作点大大提高，体积成倍缩小，而且具有优异的温度稳定性，已经成为新型高频大功率变压器的首选铁心材料。典型的高频变压器用纳米晶铁心的铁损见图 2.3-65。在高频变压器设计中，铁基纳米晶铁心的工作点可以取 0.5～0.8T (20kHz)，视不同的工作条件和冷却条件而定。图 2.3-70 是剩余电流动作保护器互感器纳米晶铁心的伏安特性曲线，图 2.3-71 是纳米晶共模电感铁心的磁导率频率特性曲线。

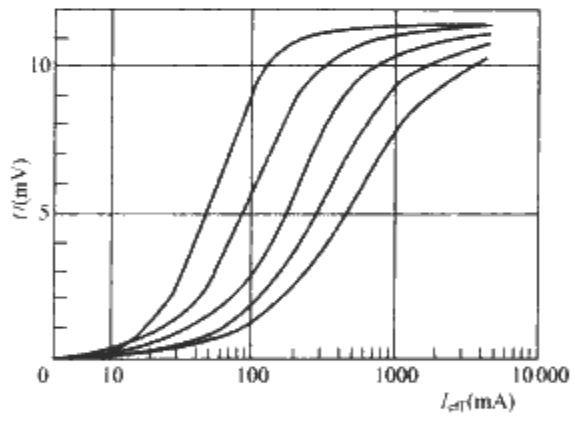


图 2.3-70 剩余电流动作保护器互感器
纳米晶铁心的伏安特性曲线

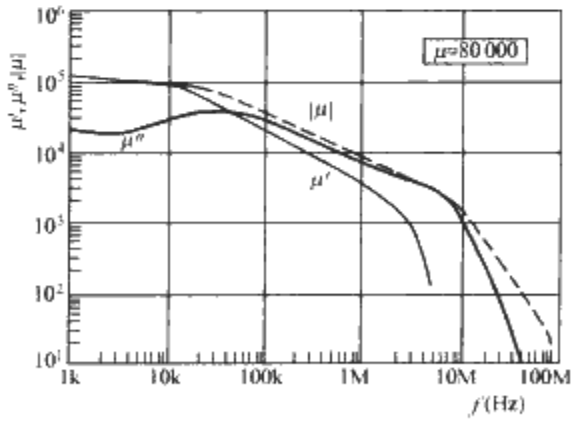


图 2.3-71 纳米晶共模电感铁心的
磁导率频率特性曲线

6.2.3.2 高频共模电感铁心

随着电子设备的广泛应用，对电网的电磁干扰日益加剧。为了抑制传导型共模电磁干扰，国际上制定了 150kHz～30MHz 频率范围内严格的电磁兼容标准。一般采用共模电感及滤波电容等元器件抑制共模干扰。传统上一直采用铁氧体作为共模电感铁心。

作为共模电感应用时，纳米晶铁心最重要的磁特性为：

交流磁导率：在 10kHz 时，纳米晶铁心的初始磁导率一般在30 000～80 000之间。

单匝电感量：单匝电感量 A_L 便于测量，往往为共模电感设计者所参考。但是如果将单匝电感量用来评判共模电感的品质则是很片面的。首先，一般情况下电感量只在1～100kHz 条件下测量，而共模电感大多数需要抑制150kHz～30MHz 的干扰，由于磁性材料的性能随频率的变化相当复杂，不能由低频性能来简单推断高频性能。其次，电感量仅仅代表了弹性磁导率，而忽略了损耗磁导率的贡献。只有不同匝数下的阻抗频率特性曲线才能充分体现共模电感铁心的品质，真正有助于 EMC 器件设计。图 2.3-72 是纳米晶共模电感铁心的单匝电感量随频率的变化曲线。

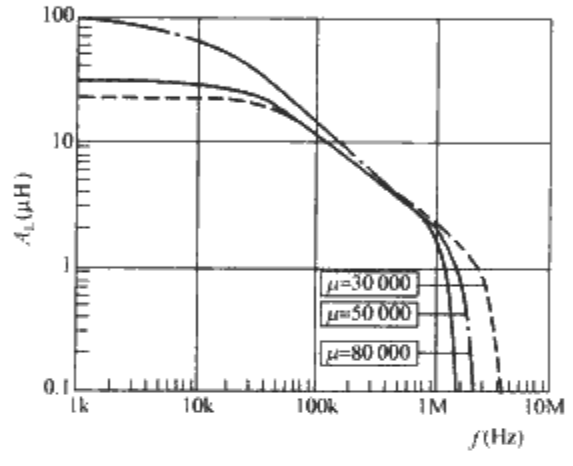


图 2.3-72 纳米晶共模电感铁心的单匝
电感量随频率的变化

交流阻抗：共模电感的阻抗直接决定了它对干扰信号产生的插入损耗，是共模电感最重要的电磁特性之一。共模电感铁心可以等效为纯电感和纯电阻的串联，其总阻抗为：$Z=(X_L^2+X_R^2)^{1/2}$。因此，共模电感的阻抗与铁心材料的弹性磁导率及损耗磁导率、铁心尺寸、线圈匝数、频率等多种因素有关。

以磁导率为50 000的共模电感铁心为例，阻抗随频率的变化可以分为三个阶段：

在约 70kHz 以下的低频段，阻抗主要是铁心弹性磁导率的贡献。由于在该频段纳米晶材料的弹性磁导率远远高于铁氧体，因此具有明显大于铁氧体的阻抗。换言之，纳米晶共模电感铁心对低频共模干扰的抑制效果明显优于铁氧体。

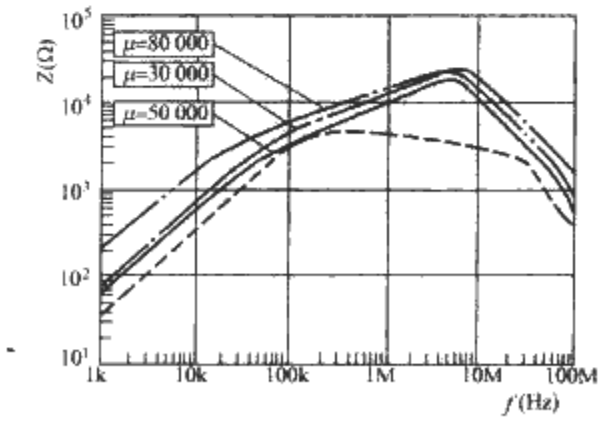


图 2.3-73 纳米晶共模电感铁心的
阻抗频率特性曲线

在约70kHz～10MHz的中频段，阻抗缓慢升高，并在1～10MHz达到峰值。随着线圈匝数的增多，阻抗峰值增大且峰位左移。

在10MHz以上的高频段，阻抗呈下降趋势，这是由于弹性磁导率及损耗磁导率都急剧降低，并且线圈的分布参数逐渐起作用。由于纳米晶材料在该频段的磁导率仍然高于铁氧体，在保证同样阻抗的条件下可以减少线圈匝数，因而分布参数较小，导致阻抗的下降比铁氧体器件缓慢。因此纳米晶铁心在高频段的表现仍然优于铁氧体。

图2.3-73是纳米晶共模电感铁心的阻抗频率特性曲线。

6.2.3.3 饱和电感铁心

在小型开关电源中经常使用饱和电感作为磁放大器式稳压和消除尖峰干扰，它们对铁心的一般要求是剩磁比（矩形比）高、铁损低。纳米晶合金作为饱和电感铁心时，剩磁比可以高达0.9以上，铁损明显低于坡莫合金，是理想的饱和电感铁心材料。

第 4 章 新型磁功能材料

1 磁制冷与磁蓄冷材料

1.1 磁卡效应热力学基础

磁卡效应（Magnetocaloric Effect，MCE）指的是磁性材料在等温磁化时向外界放出热量，而绝热退磁时温度降低，从外界吸收热量的现象。该现象最早由 E. Warburg 于 1880 年发现。

对于定压下某一材料，MCE 的两个参数绝对温度 T 和磁场变量 $\Delta H(H_f - H_i)$存在函数关系。由于在给定磁场 H_f 和 H_i 下材料总熵变（S）是温度 T 的函数，MCE 可以由此计算。

$$\Delta S_M(T,\Delta H)_{\Delta H} = S(T,H)_{T,H=Hf} - S(T,H)_{T,H=Hi} \tag{2.4-1}$$

$$\Delta T_{ad}(T,\Delta H)_{\Delta H} = T(S,H)_{T,H=Hf} - T(S,H)_{S,H=Hi} \tag{2.4-2}$$

直接等温测量热传递和利用式（2.4-1）测量等温磁熵变 ΔS_M 不方便，故实际上很少使用。但通过转换，式（2.4-2）中相关变量（熵）和无关变量（温度），可以用于直接测量热力学温度 ΔT_{ad}。即测量在磁场 H_f 和 H_i 下样品的温度，可得到温度变化反应增强的 MCE 值。当 $H_i = 0$ 和 $H_f > H_i$ 时，ΔS_M 和 ΔT_{ad}通常是温度的函数。

与磁化（M）、磁场强度（H）、定压热容（C）和绝对温度相关的 MCE 可以用以下基本的 Maxwell 方程表示：

$$\Delta S_M(T,\Delta H)_{\Delta H} = \mu_0 \int_{H_i}^{H_f} \left[\frac{\partial M(T,H)}{\partial T}\right]_H dH \tag{2.4-3}$$

$$\Delta T_{ad}(T,\Delta H)_{\Delta H} = -\mu_0 \int_{H_i}^{H_f} \left[\frac{T}{C(T,H)} \times \frac{\partial M(T,H)}{\partial T}\right]_H dH \tag{2.4-4}$$

由于块体的磁化数据通常作为温度和磁场的函数，相对较容易获得，故式（2.4-3）通常用于评价等温熵变。但是由于难以测量磁场和温度与热容的关系，并达到可信数学积分所需的分辨率和精度，式（2.4-4）很少用于实际计算。

1.2 磁制冷的原理和磁制冷技术的特点

磁制冷是一项绿色环保制冷技术。与传统的依靠气体压缩与膨胀的制冷技术相比，磁制冷是采用磁性物质作为制冷工质，对大气臭氧层无破坏作用，无温室效应，而且磁性工质的磁熵密度比气体大，因而磁制冷装置可以做得更紧凑。磁制冷采用永磁体、电磁体或超导磁体提供所需磁场，无需压缩机，没有运动部件的磨损问题，因此机械振动及噪声较小，可靠性高，寿命长。在热效率方面，磁制冷可以达到卡诺循环的 30%～60%，而依靠气体的压缩－膨胀的制冷循环一般只能达到 5%～10%。

在磁制冷领域中，一般按照磁制冷介质的工作温度，可以划分为以下几个温度范围：超低温（<10K）、低温（10～80K）、中温（80～250K）及室温附近。工作在超低温的磁制冷材料主要是一些顺磁盐，如铁铵钒、铬钾钒等，主要利用它们的绝热去磁来获得超低温。而在低温范围内的材料主要是镧（La）系金属及其合金，如 Nd、Er、Tm 等，主要是利用其居里温度 T_c 附近的磁热效应来制冷。纯 Dy 以及一些非晶合金，如 $R_x(T_1, T_2)_{1-x}$（R 为镧系金属，T_1 及 T_2 为过渡族金属）则主要用于中温范围的磁制冷。他们也是利用在居里温度附近的磁卡效应来制冷。室温附近的磁制冷，现在主要采用 Gd，Ga，Ge 等元素的化合物来实现。

1.3 磁制冷材料

表 2.4-1 列出了不同温区下常用的磁制冷材料。

表 2.4-1 不同温区下的磁制冷材料

温区范围	材 料	备 注
<20K	$Gd_3Ga_3O_{12}$（GGG）、$Dy_3Al_5O_{12}$（DAG）、$Y_2(SO_4)_2$、$Dy_2Ti_2O_7$、$Gd_2(SO_4)_3$、Gd（OH）$_2$、Gd（PO_3）$_3$、$DyPO_4$、Er_3Ni、ErNi、$DyNi_2$、$HoNi_2$、$Er_{0.6}Dy_{0.4}$、Ni_2ErAl_2	GGG、DAG 最为常用，GGG 适合于 1.5～10K 范围，DAG 适用于 15～20K 范围，且性能优于 GGG
20～80K	RAl_2，RNi_2 型（如 $Dy_{0.4}Er_{0.6}Al_2$、$HoAl_2$、Er、$Dy_{35}Al_{45}$、$Ho_{0.5}Dy_{0.5}Al_2$、$Dy_{60}Al_{40}$、$DyAl_2$、$NelMn_2Si_2$）和一些重稀土元素多晶材料	RAl_2 型材料复合化后得到了较宽的居里温度，如 $(Dy_{1-x}Er_x)Al_2$ 复合材料，该材料磁矩大、温度宽
>80K	重稀土及合金、稀土－过渡金属化合物、过渡金属及合金、钙态矿化合物	

重稀土元素具有很大的磁矩，故其元素及合金的磁卡效应也较大。其中 Gd 的 T_c 为 293K，接近室温，因此 Gd 及其合金就引起广泛关注，并常常用它作为研究磁制冷工质磁卡效应研究的一个对比标准。该类材料主要有 Gd、Dy、Tb、Ho、Er、Tm、$Gd_{0.7}Tb_{0.3}$、$Gd_{0.6}Tb_{0.4}$、Gd_9DyAl_{20}、$Gd_{0.73}Dy_{0.27}$、$Gd_{60}Tb_{40}$、GdEr、GdHo、$Gd_{1-x}Y_x$、$Tb_{0.63}Y_{0.37}$、$Dy_{0.7}Y_{0.3}$等。

在 80～300K 温区较理想的是 $Gd_5Si_{4-x}Ge_x$，该系列的 MCE 峰值相当大。Gd_5SiGe_3 在 148K、5T 磁场时磁熵变峰值 68J/(Kg.K)，接近 Gd 的 7 倍。但由于温区窄，而相应热量的变化是与 MCE 的面积成正比，因此实际运用中存在一定难度。此外 GdSiGe 合金的磁熵变与原料关系密切，目前都采用高纯度原料制备，也限制了它在工程中的应用。该系列材料与其他元素掺混以后也可以达到较大的 MCE 值，如 $Gd_5Si_{2-y}Ge_{2-y}$（Fe，Cu，Co，Ni，Ga）$_{2y}$、Gd_xAg_{1-x}、YFe_2、Y_2Fe_{17}、$Gd_{1-x}Al_x$、$Gd_{1-x}Zn_x$、$Gd_{1-x}Cd_x$、TbFe 等。

典型的过渡金属 Fe、Co、Ni 都有较高的 MCE 值，但由于 T_c 较高，很难工程应用。但 $Fe_{51}Rh_{49}$ 合金的 MCE 值很高，达到 308K，而且有比较宽的温度范围，可以保持这个较高的磁熵变。同时它所需的工作磁场只要 1～2T，其他一些材料都需要达到 5～7T。$Fe_{51}Rh_{49}$ 在 T_c 附近发生一级相变和场致相变。一级相变可以提高 MCE 值，而场致相变

将会使材料的工作温区拓宽。但 $Fe_{51}Rh_{49}$ 的磁热效应为不可逆的过程，多次循环以后效率就会下降，给工程实际运用增加了难度，该类系列材料有 Cr_3Te_4、$Fe_{8.5}Si_{0.5}Zr$、$Ni_{20}Mn_8V_2Sn_{11}$、$Hf_{0.83}Ta_{0.17}Fe_{2+x}$、$La_{100}Fe_{64}Co_9Al_{27}$、$MnA_5$、$Mn_{29}Al_{11}$、$Fe_3Si$、$Fe_{51}Rh_{49}$、FeRh 等。

锰钙钛矿氧化物通过双交换作用耦合而呈现铁磁性。此类化合物中磁性与晶格存在强耦合，外磁场可以导致结构相变，而结构相变又引起 T_c 附近磁化强度变化增强，从而使 M-T 曲线在 T_c 附近变化很陡峭，即$\frac{\partial M}{\partial T}$很大，故相应的 ΔS 很大，在该温度区内的磁卡效应显著。另外，通过离子交换，材料的 T_c 可以从低温到高温的相当宽的温度区内变化。这对于高宽温磁制冷工质是十分重要的，有可能组合不同 T_c 的复合材料，以满足不同循环要求的磁熵变－温度曲线。这里锰钙钛矿化合物还具有化学稳定性高、电阻率高、涡流效应小、价格低等优点，但磁熵变比 GdSiGe 系列的小。该类材料主要有 $BaFe_{10}Cr_2O_{19}$、$GdFe_{0.4}Al_{0.6}O_3$、$Gd_{30}Fe_{38}Cr_{17}O_{12}$、$La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$、$La_{0.8}Ca_{0.2}MnO_3$、$La_{0.75}Gd_{0.1}Ca_{0.33}MnO_3$、$La_{0.799}Na_{0.199}MnO_{2.97}$、$La_{837}Ca_{98}Na_{38}Mn_{987}O_{300}$ 等。

具有磁卡效应的纳米颗粒必须分散在基体中以防止与表面能最小化导致的团聚现象。在活性 MCE 纳米颗粒的相同温区内，通常基体表现出很小的磁卡效应。故人们通常认为纳米复合材料的 MCE 相当低。另外，对于典型的纳米复合材料，纳米颗粒的体积浓度通常在 50% 以下。整体的 MCE 按照非活性基体和活性颗粒的体积（或质量）比例减小，而且由于基体的高热容影响，合成的 MCE 会受到抑止。但除基体效应外，和传统顺磁体相比，纳米颗粒通常表现出超顺磁效应，这又可以增强 MCE。

由于纳米材料高比表面积的本征特点导致热传递提高，未来可望应用于低温（20K 以下）磁制冷装置。但在室温用磁制冷器中利用纳米复合材料，在可预见的将来还存在许多困难。

1.4　磁蓄冷材料和磁蓄冷器

在 15K 以下的低温范围内，一般的小型磁制冷机由于缺乏有效的蓄冷材料，制冷效率比较低。通常在液氮温度以上，都采用铜作为蓄冷材料，而液氮温度以下，则都采用铅来蓄冷。作为蓄冷材料，除希望有比较高的比热容外，还要求有好的耐腐蚀性和加工性，使之经济性提高。

通常，固体物质的比热容由晶格系统的热振动决定，随着温度的降低，晶格的热振动越来越弱，固体的比热容也越来越低。除了晶格比热容或数值更小的电子比热容外，固体在发生相变时，伴随着熵的急剧变化，固体的比热容也会增大，特别是磁性介质这种现象更为明显。因此，在 15K 以下的低温范围内，磁相变出现的磁比热容峰值往往要比晶格比热容大一个数量级。为了选择作为蓄冷材料的磁性介质，首先研究在磁相变时的比热容变化，可用下式表示：

$$\Delta c_J = 5R\frac{d_m}{N_A}\frac{J(J+1)}{J^2+(J+1)^2} \tag{2.4-5}$$

式中：Δc_J 为相应温度附近的比热容变化；d_m 为磁自旋的总数；N_A 为阿佛加德罗常数；R 为气体常数；J 为自旋的全角动量量子数。

为提高磁蓄冷材料的比热容，在选择时应注意以下几个基本条件：

（1）具有较大的磁自旋数 J。

（2）单位体积中的磁自旋数 N 也应大。

（3）相变温度 T_c 应该在 4～15K 之间。

（4）材料的化学稳定性好。

（5）有较好的加工性能和经济性。

在 3d 过渡族和 4f 稀土族离子中，Dy、Ho 和 Er 这几种离子的 J 值最高，其数值都在 7 以上。从相转变温度（T_c）考虑，含 Er 的化合物比含 Dy 和 Ho 的化合物的相转变温度低；而含 Ni 的稀土化合物比含 Co、Fe 的稀土化合物的相转变温度更低，所以，在探寻低温磁性蓄冷材料时集中在 Er 和 Ni 的化合物中更为适合。为了获得在单位体积中含有较多磁自旋（磁离子）数目的材料，还可以利用化合物的晶格常数来分析。

对德拜温度 θ_D 可以利用下式进行估算：

$$\theta_D = B\left(\frac{T_M}{MV^{\frac{2}{3}}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.4-6}$$

式中：T_M 为物质的熔点温度；M 为平均相对分子质量；V 为平均原子体积；B 为与晶格结构相关的常数。

对于磁制冷材料，由于晶格系统的熵在制冷系统中作用不大，故要选择晶格熵小，也就是德拜温度 θ_D 高的材料；对磁蓄冷材料，希望其比热容要高，而不考虑晶格比热容或磁比热容所占比例，故德拜温度 θ_D 低的材料也是有利的。

一般地，熔点温度愈高，θ_D 也愈高。可以根据化合物的平衡相图查得熔点温度较低的材料，从而获得德拜温度 θ_D 较低的物质作磁蓄冷材料。综合考虑以上各因素后，采用 Er_3Ni、ErNi、$Er_{1-x}Dy_xNi_2$ 和 $Er(Ni_{1-x}Co_x)_2$ 等作为磁蓄冷材料较为合适。

目前常用的磁蓄冷材料往往体积热容高而热导率低，所以其热扩散率大约只有铅的百分之几，甚至更小。这样就必须根据它们的特性设计合适的设备结构和形状尺寸，从而发挥出最佳的蓄冷性能。

小型低温气体制冷机用蓄冷器主要有 Stirling 和 Gifford-Mac Mahon 循环制式，而到目前为止，磁蓄冷材料在制冷机中的应用研究，主要集中在 G—M 制冷机，一般用于其中的第二级蓄冷器。

室温条件下由于磁性材料的晶格熵增大到不能忽视的程度，部分磁制冷系统的制冷能力将消耗于冷却晶格热负荷，从而导致系统制冷能力下降。在系统中增加蓄冷器可以在循环的某一阶段将晶格系统释放的热量储存，而在另一个阶段再返回到晶格系统中。这样磁制冷系统中用于冷却晶格热负荷的制冷能力将得到更有效的利用，有效熵变增加，温跨增大。

用于室温磁制冷机中的蓄冷器可以分为三种形式：外部蓄冷器、内部蓄冷器、活性蓄冷器（Active Magnetic Regenerator，AMR）。活性蓄冷器中的磁性材料既是磁性工质又是蓄冷材料。这种形式可以减少外部蓄冷器形式中二次换热产生的不可逆损失，还可以减少内部蓄冷器形式中的不同温度的蓄冷液体混合产生的不可逆损失。

如单级活性蓄冷器是一个装有磁性工质材料的多孔填料床，其中用磁性材料制成的多孔填料床既作为换热流体换热的蓄冷材料，又作为产生冷量的制冷工质。蓄冷器内换热流体经蓄冷器交换热量到外部换热器。

AMR 循环受到最多的关注，特别是在近室温应用场合。关于磁制冷 AMR 循环的论文和专利最早由 Barclay 在 1983 年的 NASA 会议上提出。他证明在制冷器和活性磁组件中同时使用磁性材料获得的温升比单纯磁制冷材料的 ΔT_{ad} 要大。Chen 等评价了许多热动力循环在 298K 下的磁制冷，得出 AMR 循环是最有效率的一种。

1.5 磁制冷系统与装置

为实现制冷循环，只要首先在高温环境中对工质施加外场，并等温地实现伴随着熵的减少而进行的发热过程；然后在低温下撤除外场，让工质进行等温吸热；最后在这两个过程之间用适当的过程加以连接，就可以完成制冷循环。

根据用不同种类的过程连接上述两个等温过程，可以定义各种不同的制冷循环。其中具有较高效率的基本循环有卡诺(Carnot)循环、斯特林(Stirling)循环、埃里克森(Ericsson)循环以及布雷顿(Brayton)循环四种，其相关特性如表 2.4-2 所示。

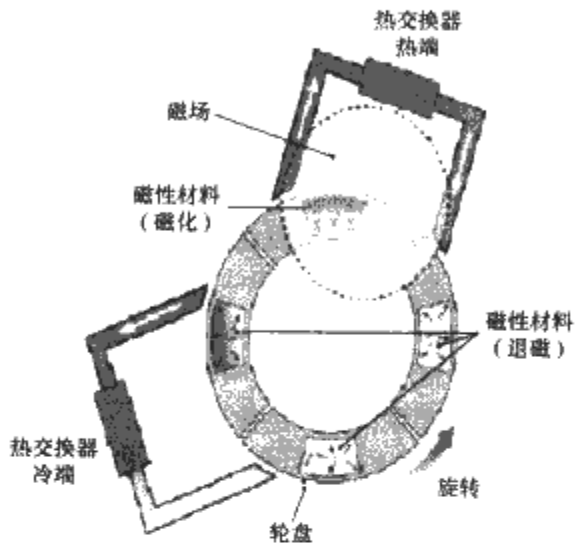


图 2.4-1 旋转式磁制冷机的结构图与实物

表 2.4-2 Carnot 循环、Stirling 循环和 Ericson 循环的特性

名称	磁 系 统	工作温度范围	蓄冷器	结构与操作
Carnot 循环	绝热磁化＋绝热去磁	20K 以下	无	简单
Stirling 循环 Ericson 循环	等磁矩(强磁场)＋ 等磁矩(弱磁场) 等磁场(强磁场)＋ 等磁场(弱磁场)	室温以下	必须	复杂

磁制冷系统或装置主要由磁制冷工质、热开关、电磁体及其控制系统组成。目前主要存在旋转式和活塞式两种完成制冷循环的方式，其相似点是机械结构复杂。

应用于磁制冷机的热开关大致可分为三种：

(1) 采用合适的热开关材料将磁制冷工质和热源相互连接，如具有磁阻效应的材料。

(2) 采用热管等作为热开关系统，如热虹吸管型热管。

(3) 采用磁制冷工质的移动构成热开关，其中高温端与低温端用绝热壁来分割。

作为磁制冷中重要组成部分的磁场源，其能量效率直接和场大小相关。对于大规模的应用场合，如气温控制、超市制冷机、冷冻厂等，利用液氦或制冷机维持在 4K 左右的温度，利用超导磁体可以保证较高的效率。但对家用和汽车用场合，至少在可预见的未来还不得不采用永磁体。因此设计一种针对磁制冷的高场、低成本的永磁体阵列是促使磁制冷机在消费市场上商业化应用的关键问题之一。

卡诺循环磁制冷机可以分成两类：

(1) 从约 20K 开始以氦的液化为目的的卡诺循环磁制冷机。

(2) 从约 4.2K 开始以生成超流氦为目的的卡诺循环磁制冷机。

氦液化制冷机根据工作原理可以分为静止型和工质移动型两种。静止型氦液化卡诺循环磁制冷机，磁制冷工质和超导磁体的位置都固定不动，通过超导磁体的励磁和减磁来实现对工质的磁化和去磁；工质移动型氦液化卡诺循环磁制冷机，采用工质移动型热开关，在高温热交换室和低温热交换室之间设置绝热壁，让磁制冷工质往复于两个热交换室。磁性工质的移动方式可以分为上下往复型和旋转型两种。图 2.4-1 是旋转式磁制冷机的结构图与实物，图 2.4-2 是一种往复式磁制冷机的结构示意图。

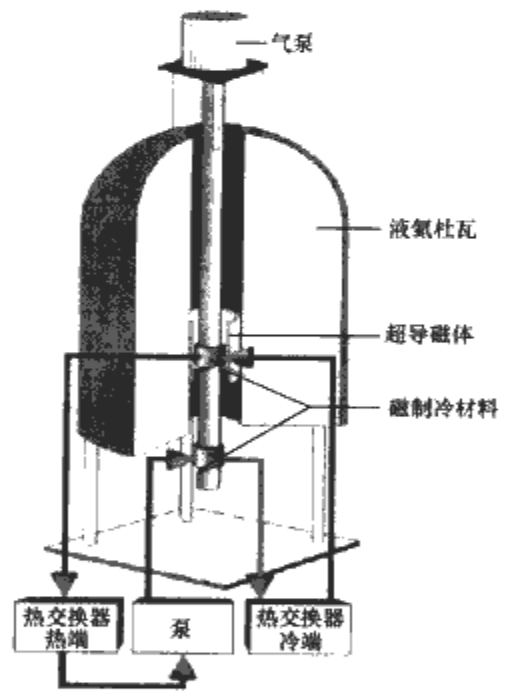


图 2.4-2 一种往复式磁制冷机的结构示意图

与 Carnot 循环相比，温度 20K 以上，特别是近室温附近，磁性离子系统热运动大大加强，磁性工质的磁有序态难以形成，在受外磁场作用前后的磁熵变大大减小，同时强磁场的产生也受条件的限制，磁热效应也大大减弱。所以进入高温区制冷，低温磁制冷所采用的材料和循环都不适用。

高温区的磁制冷主要采用 Ericson 循环磁制冷机，如 1976 年的美国 NASA 的 Lewis 研究中心的 G. V. Brown 的室温磁制冷机。也有采用 Brayton 循环的，如 1996 年美国航天技术中心的 C. Zimm 的室温磁制冷机。这二者都是采用超导磁体和往复式结构。2001 年 9 月美国宇航公司联合 Iowa 大学的 Ames 实验室成功开发了首台采用永磁体提供磁场的回转式磁制冷机，为磁制冷技术真正进入民用领域打开了道路。

2　稀土巨磁致伸缩材料

2.1　磁致伸缩现象

磁致伸缩效应(Magnetostrictive Effect)是指铁磁性物质在外磁场作用下,其尺寸伸长或缩短,去掉外磁场后,其又恢复原来的长度的现象。磁致伸缩效应可用磁致伸缩系数(或应变)λ 来描述:

$$\lambda = \frac{L_H - L_0}{L_0} \tag{2.4-7}$$

式中:L_0 为原来的长度;L_H 为物质在外磁场作用下伸长(或缩短)后的长度。

图 2.4-3 是磁场下尺寸变化量与原长比值的示意图。当磁致伸缩为正,样品伸长,直径缩短以保证体积一定;当磁致伸缩为负,则样品缩短,直径增大。因此随着磁场的循环,可以获得对称的磁致伸缩效应曲线。如果对应非轴向压力,原子间重排会导致磁矩重定向,从而改变整体的磁化。该效应可以用于遥感和测向。

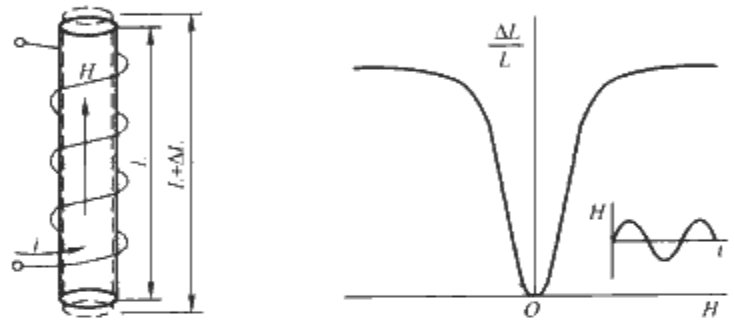


图 2.4-3　磁场下尺寸变化量与原长比值的示意图

由于磁致伸缩是磁性材料的内禀特性,不会随时间退化,如同某些压电材料。而且磁致伸缩材料的应变、压力、能量密度和耦合系数等特性和基于压电材料上的换能器技术相比,更具优势。但许多设计和建模的问题防碍了磁致伸缩材料的应用。如需要螺线管和相关磁场组件,磁致伸缩换能器通常比采用压电或电致材料的体积更大,故磁致伸缩材料的首选用于重型结构。

2.2　磁致伸缩的理论基础及原理

虽然在换能器上的用途有些类似,但磁滞伸缩材料的磁滞伸缩效应明显强于其他软磁材料。类似压电材料,磁滞伸缩材料可以定义为压磁材料。非极化状态下很少表现出纯粹的压磁效应,除如 CoF_2、MnF_2、Fe_2O_3 等少数反铁磁材料外。已知的磁—力学效应如下:

(1) Joule 磁致伸缩:沿施加场方向产生的应变,分为纵向和横向,属于最常用的磁滞伸缩效应。虽然大多数磁性材料表现出 Joule 磁致伸缩效应,但只有很少一些含稀土元素的化合物可以产生超过 1000×10^{-6} 的应变。这些大应变由依赖原子间距和磁运动方向的强磁致弹性耦合作用决定。

(2) Villari 效应:磁—力学效应,指材料受非轴向压力产生的磁化变化,能量从弹性能转换为磁能,属于 Joule 磁致伸缩的反效应。

(3) ΔE 效应:磁滞伸缩材料的弹性由两个相互区别但又有关联的部分构成,传统的原子间力产生的应力—应变弹性和磁矩旋转产生应力导致的应变。$\Delta E=(E_s-E_0)/E_0$,E_0 为最小弹性模量,E_s 为饱和磁化状态下的弹性模量。Ni 的 ΔE 为 0.06,Terfenol-D 为 5,Metglas 2605SC 为 10。

(4) Barnett 效应:磁性圆柱体在绕其柱轴做高速旋转时会产生微弱的磁化强度,其大小与角速度成比例,即旋转致磁化效应。

(5) Einstein-de Hass 效应:当自由悬挂的磁性圆柱体突然被磁化时会产生微弱的旋转。即磁化致旋转效应,属于 Barnett 效应的逆效应。

(6) Wiedemann 效应:铁磁或非晶线的电流产生垂直于导线的环形磁场,磁矩优先取向为圆周取向。施加轴向磁场时,螺旋方向的磁矩取向产生螺旋磁场。螺旋磁晶各向异性产生的扭矩称为 Wiedemann 效应。

(7) Matteuci 效应:施加在扭曲导线上由电流产生的轴向磁化的变化,Wiedemann 效应的反效应。

(8) Barret 效应:在正常操作过程中磁滞伸缩材料的体积实际上没有变化,但在某些极端情况下,材料的体积会受磁场影响而改变。这种非正常的体积变化就是所谓的体积磁滞伸缩或 Barret 效应。

(9) Nagaoka-Honda 效应:体积改变引起的材料磁状态的改变,Barret 效应的反效应。

2.3　磁致伸缩材料的发展

1842 年 James P. Joule 发现铁的磁致伸缩效应,最早的磁致伸缩材料为铁、镍、钴。第二次世界大战中人们就利用镍作为声纳的磁致伸缩材料。20 世纪 60 年代早期,随着稀土元素中具有最强磁致伸缩效应的 Tb 和 Dy 的发现,磁致伸缩材料经历了巨大的发展。低温下,这些材料的应变可达到10 000ppm,是镍的 3 个数量级。温度限制和压电陶瓷的技术成熟防碍了磁致伸缩材料的发展,故到 70 年代早期,人们都在寻找新的具有高室温条件应变的磁致伸缩材料。高磁致伸缩稀土材料 (R),主要有 Sm、Tb、Dy 等,和磁性过渡金属 (T),如 Ni、Co、Fe 等,通过直接合成或快淬的方法形成非晶合金。与 R—Ni 和 R—Co 化合物的正常居里温度相比,R—Fe 化合物居里温度随稀土含量的增加而上升。但由于磁致伸缩效应源于磁各向异性的应变,故大的磁致伸缩效应需要大的磁各向异性,为使该材料达到饱和,需要超过 2 MA/m 的磁场,这给工程应用带来了很大的困难。

1987 年发现了一种新的基于非晶金属的磁致伸缩材料,采用快淬方法合成,主成分有铁、镍、钴合金,同时包括硅、硼、磷等其中一种或几种,商品名为金属玻璃(Metglas),通常制成薄带状。由于具有超高耦合系数($k>0.92$),金属玻璃是用于机械能转换为电流或电压的探测器用材料的首选。关于磁致伸缩材料新的研究方向还有开发减小磁各向异性和磁滞效应的化合物、高效生产 Terfenol-D 薄膜、通过采用 Ho 替代 Tb 或 Dy,开发新的四元化合物—Terfenol-DH 等。另外,采用新工艺可以生产多层膜驱动棒以减小动力损失,它有利于应用范围扩展到兆赫频率。铁磁形状记忆合金是另一种类的智能材料,具有巨大的应变,有较好的应用前景。镍钛合金 (商业名 Nitinol) 回复应变为60 000$\times10^{-6}$,但动力回复力较差。目前正在研制通过磁场驱动由形状记忆材料和磁致伸缩材料组合成的制动器。有希望的材料如 Ni_2MnGa 系统和铁基合金。

2.4　磁致伸缩材料的特性

2.4.1　磁各向异性

表 2.4-3 列出了主要磁致伸缩材料的性能。

磁晶各向异性能和磁致伸缩具有紧密联系,如果各向异性与应变无关,则不存在磁致伸缩效应。具有正磁致伸缩的材料在中等压力下表现增强的磁致伸缩效应。太小或太大的压力减小磁致伸缩。对具有负磁致伸缩系数的材料,如镍,

作用相反，拉应力可以增强磁致伸缩效应。另外，受压情况下，如果与受压方向垂直的磁矩取向增加，则去磁化轴的长度减少至最小，饱和磁致伸缩增至最大。

表 2.4-3 磁致伸缩材料的性能

材 料	磁致伸缩 λ (10^{-6})	密度 (g/cm³)	饱和磁感应强度 B_s (T)	居里温度 T_c (K)	弹性模量 E (GPa)	耦合系数 k
Fe	−14	7.88	2.15	633	285	
Ni	−50	8.9	0.61	1043	210	0.31
Co	−93	8.9	1.79	1393	210	
50%Co—50%Fe	87	8.25	2.45	773		0.35
50%Ni—50%Fe	19		1.60	773		
$SmFe_2$	−2340	8.53		688		
Fe_3O_4	60			858		
Tb	3000 (−196℃)	8.33	8.33	225	55.7	
Dy	6000 (−196℃)	8.56	8.56	89	61.4	
$DyFe_2$	650	9.28		635		
$TbFe_2$ (Terfernol)	2630	9.06		703		
$Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$ (Terfernol-D)	1600～2400	9.25	1.0	653	110	0.77
$Tb_{0.6}Dy_{0.4}$	6300 (−196℃)			215		
TbZn	4500～5500			180		
TbDyZn	5000			250		
Metglas 2605SC	60	7.32	1.65	643	25～200	0.92

2.4.2 磁畴运动和磁滞效应

磁化过程按磁矩旋转和畴壁移动分为可逆和不可逆。当施加小磁场时，与场方向相同的优先取向磁畴增加，主要磁化机制为畴壁运动。随着场的增加，整个磁畴旋转至易磁化轴方向 [111]。这样小磁场变化就产生大的磁致伸缩或应变，得出相应的 $M-H$ 和 $\varepsilon-H$ 曲线。当磁场最大时，材料表现为单畴状态，磁矩从易磁化轴转向外磁场方向。

对于低饱和磁场的情况，$M-H$ 和 $\varepsilon-H$ 曲线近似表现为线性，但总表现出一定的磁滞效应。磁滞的原因可以归为钉扎点对磁畴运动的不可逆损失，如畴壁运动需要经过 Terfenol-D 的两个晶界时的情况。模拟磁滞效应和非线性情况时，设计和控制磁致伸缩是材料的焦点问题之一。

2.5 $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ 材料的制备与生产

采用 Dy 部分取代 $TbFe_2$ 中的 Tb，可以提高磁致伸缩和磁晶各向异性。20 世纪 80 年代三元化合物 TbDyFe 以 Terfenol—D 命名并投入使用。在饱和磁场 0.16MA/m 下，Terfenol—D 的室温最大磁致伸缩为 1600×10^{-6}，而且当应用于机械共振驱动的换能器时，最大磁致伸缩可以高达 3600×10^{-6}。

Terfenol—D 合金的生产方法主要有 4 种：

(1) 自由区熔法 (Free Stand Zone Melting，FSZM)。

(2) 改进布里奇曼法 (Modified Bridgman，MB)。

(3) 颗粒模压烧结法。

(4) 塑脂基 Terfenol—D 复合物。

定向凝固的 FSZM 和 MB 能够生产具有高磁滞伸缩和能量密度的 Terfenol—D 合金。由于过程没有采用容器和表面张力限制了熔融区域，FSZM 方法生产的棒材最大限制在 8mm。由于模具边缘的形核速度超过起始轴向枝晶的生长速度，MB 法生产的棒材最小直径为 10mm。采用以上两种方法生产除正合适的圆柱体外，复杂形状的产品均需要二次机械加工。

采用标准的粉末冶金烧结的方法可以生产具有复杂形状的产品，如非常小的零部件。塑脂基复合材料具有更高的电阻率，特别适合涡流损失大的高频应用场合。但是出于模具限制和成本考虑，采用粉末方法制得的部件直径在 10mm、长度在 100mm 左右。许多低频声纳和振动控制器，需要采用大直径的驱动单元以产生大的出力。另外，和块体材料相比，通常采用粉末技术生产的棒材的磁滞伸缩性能相差明显，但生产成本却相差不多。

由于金属材料在交变磁场中固有的涡流损耗，最早的 Terfenol—D 材料被限制用于低频（小于 1000 赫兹）。为降低涡流损耗，有必要对驱动器采用层状设计。器件使用频率的上限与层的厚度成反比。Terfenol—D 是硬且脆的材料，需要采用特别的机加工方法。金刚石锯片很合适用来生产 1mm 厚度片材，产量可达每小时 35 000mm²。虽然很浪费原料，但采用锯片将大块材料切割成小块，比直接生产小件产品还是要经济。硅晶圆加工中采用的线锯能够同时切割多个培件和很小的 Kerf 损失，也可以用于 Terfenol—D 规模生产。

复杂形状的 Terfenol—D 可以用于许多特殊场合，如传感器。但由于材料硬且脆，传统的钻孔和切削方法就不适用了。另外，这种脆性与材料本征的脆性 R—Fe_2 层密切相关，故从 1990 年起，人们开始采用复合材料的方法来降低材料脆性和减少涡流损耗。通常采用的方法有两种：R—Fe_2 颗粒或层与树脂复合，树脂渗透复合材料。近来，开发的树脂渗透颗粒取向复合材料 (Polymer Infiltrated Grain Aligned Composite，PIGAC) 具有很多优点，如可以保持晶体择优取向、有效改善本征脆性等。另外，在 R—Fe_2 颗粒和树脂渗透复合材料的生产过程中不必施加磁场。图 2.4-4 是不同工艺过程合成的 (Tb，Dy) Fe_2 和 Fe—Pd 薄膜的性能。

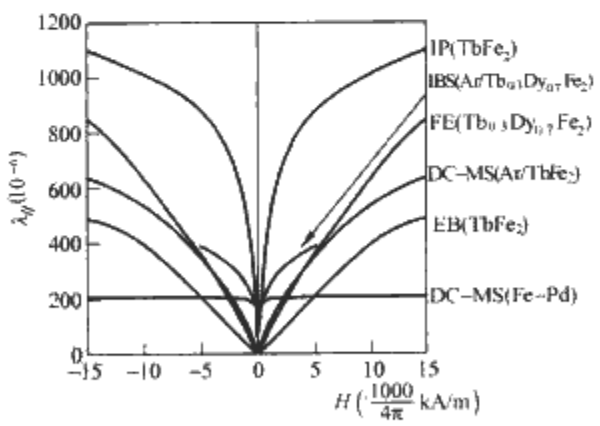


图 2.4-4 不同工艺过程合成的 (Tb，Dy) Fe_2 和 Fe-Pd 薄膜的性能：离子镀 (IP)、离子溅射 (IBS)、真空快速蒸发 (FE)、直流溅射 (DC-MS)

2.6 Tb-Dy-Fe 材料的应用领域

Terfenol—D 有多种形式，如单体棒、颗粒取向树脂基复合物、薄膜等。由于具有大磁致各向异性和强磁滞弹性，

Terfenol—D 可以和其他稀土－铁化合物合成，呈现宽范围的特性。

磁滞伸缩换能器和其他形式换能器相比，可以由低阻抗放大器驱动，特别在低共振频率下，低阻抗磁致伸缩换能器意味着驱动电压可以很低。这样特别适用于医疗用途，另外还可以简化设计。通常，磁滞伸缩换能器包括圆柱状磁滞伸缩棒、环绕铜螺线管、由螺栓和弹簧垫圈组成的预载机构、磁轭和提供偏转磁化的桶状永磁体等。

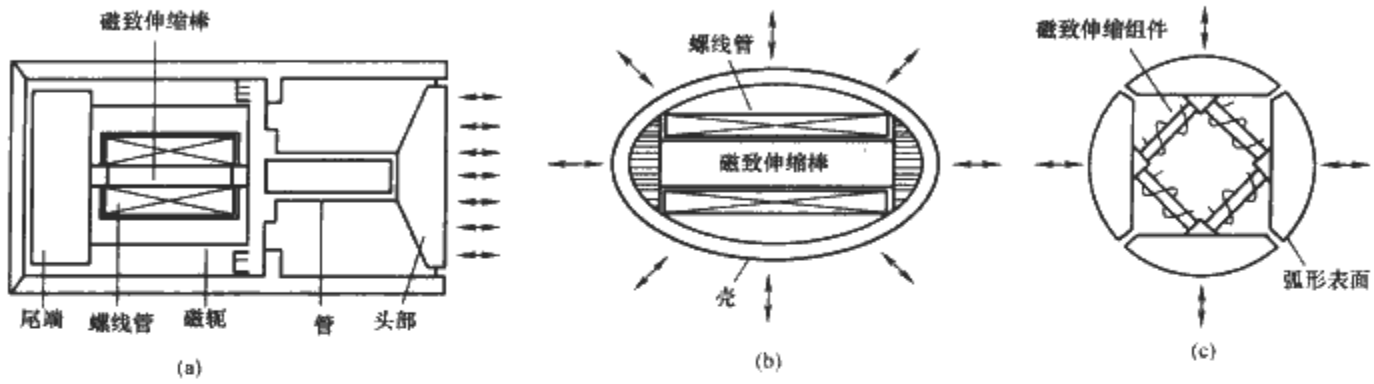


图 2.4-5　声纳换能器结构示意图
(a) 纵振；(b) 弯曲伸张；(c) 四面环

(1) 声纳换能器。高效的声纳器要求在低频下产生高机械能量，还包括宽频带和低品质因素 Q 等。第二次世界大战中的声纳广泛采用镍，镍的磁力耦合系数为 0.3，故对应需要高 Q 以获得好的效率；相比之下，新的巨磁致伸缩材料的磁力耦合系数超过 0.3，故能在低 Q 情况下输出更高的能量。图 2.4-5 是声纳换能器结构示意图。

(2) 线性电机。负载和磁致伸缩元件的直接耦合效应表明净负载偏移受磁滞伸缩限制。例如，11.4cm 的 Terfernol—D 棒最大偏移为 0.2mm。根据 Joule 磁致伸缩在定体积中的效应，人们采用 Kiesewetter 蠕虫电机就可以在 Terfernol—D 棒中获得超过最大应变限制的负载，可以用于造纸工艺中涂层重量和纤维分布的控制、机械工具产业中的阀门控制和精确定位器等。图 2.4-6 是利用 Tefenol—D 的线性直线电机结构图。

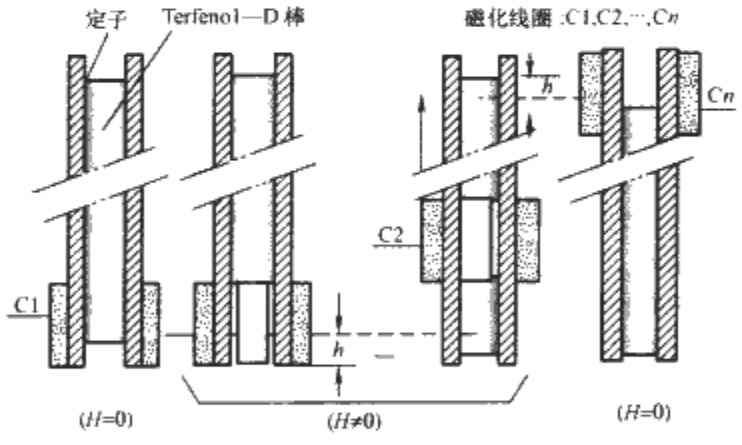


图 2.4-6　利用 Tefenol—D 的线性直线电机结构图

虽然在兆赫兹频率下为产生超声波能量，人们倾向于采用压电换能器，但在某些低超声波段，更倾向于采用大位移、低压大出力的磁致伸缩材料。如在医疗领域采用 Terfernol—D 制成的超声波工具就比传统的压电材料制成的工具要轻便、简洁。其他用途还包括：工业清洗、声波细胞消毒杀菌、摩擦焊接、高压泵、主动阻尼器、直升机叶片控制等。

(3) 旋转电机。基于磁滞伸缩原理的智能材料电机与传统的水力和电磁系统相比，更为简便和可靠性高。这方面的研究和商业开发主要集中在超声波旋转电机，其可以应用于相机镜头自动对焦及机器人控制等广泛领域。除高精度和高固定扭矩外，Claeyssen 等人还设计出新的机制，以提高现有蠕虫式旋转电机的效率。该原型机可以产生最大 2N·m 的扭矩和最大 17rpm 的转速。

(4) 磁致伸缩/压电复合器件。由于磁致伸缩材料为电感性且压电材料为电容性，因此兼容这两种材料于同一器件形成一共振回路很有优势。受谐振驱动时，该器件表现为一个纯粹电阻，能量可以有效转变为机械运动，外部只需要输入内耗损失。这样极大地简化了放大器设计和为获得高效率的辅助。另外，复合磁致伸缩/压电材料的换能器也可以在线性蠕虫电机和旋转电机中使用。图 2.4-7 是 PZT/Terfenol—D/PZT 三层结构复合器件的实物图和SEM 图。

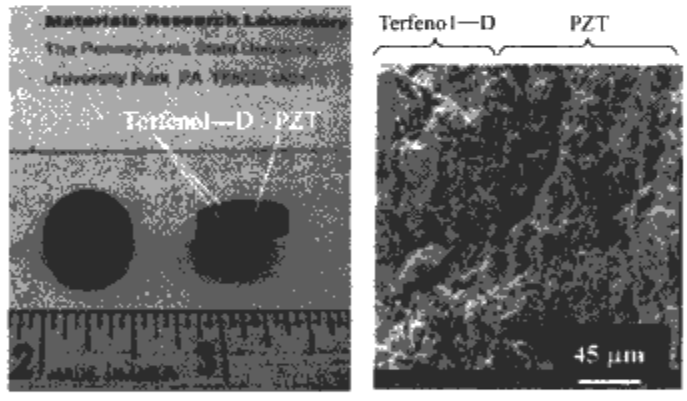


图 2.4-7　PZT/Terfenol—D/PZT 三层结构复合器件的实物图和 SEM 图

2.6.1　制动器应用

由于具有高能量密度、高出力、宽频率范围和快速反应的特点，主要采用 Terfernol—D 磁滞伸缩材料的制动器正得到越来越多的应用。这方面的用途有：声纳、钻孔工具的振动控制器、高精度微定位控制器、钻孔振动源、地质断层扫描、燃料注入系统的压力阀、可变棱镜、水压泵、骨骼传导助听器、外骨骼电控制器、自感应制动器、工业用超声波清洗器等。目前的换能器设计主要集中在以下四个方面：

2.6.2　传感器应用

受压力、应变、扭矩等机械效应及磁场极化的影响，通过磁力耦合效应，磁致伸缩材料产生可测量的磁各向异性，并可以通过线圈产生电信号来表达。另外，也可以采用干涉测量法来检测受外部激励时磁致伸缩材料的变化，例如与 ΔE 效应相关的硬度变化。

2.6.2.1　扭矩传感器

图 2.4-8 是某电子助动车用巨磁致伸缩材料制作的扭矩传感器。磁滞非接触扭矩计是基于扭矩施加于轴时将产生沿轴向±45°的$+\tau$和$-\tau$压力，如果轴为磁致伸缩材料或粘结有磁致伸缩非晶带，沿$+\tau$和$-\tau$方向的磁性能将会改变，再通过与之垂直的线圈或霍尔效应传感器测量。这种形式的

扭矩传感器可以应用于汽车上的电控操作驾驶系统。另一类非接触式扭矩仪是基于磁致伸缩材料受扭转应力时产生的磁导率变化，这样由施加扭矩导致的磁导率变化可以在感应线圈产生微分电压，从而通过传感器测量。

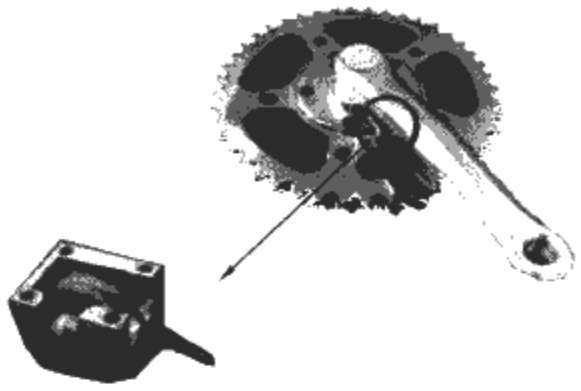


图 2.4-8 某电子助动车用巨磁致伸缩材料制作的扭矩传感器

2.6.2.2 变形与位置传感器测量

经过横向磁场退火的磁滞伸缩带或线可以制成非常灵敏的应变测量仪。与材料应变状态相关的磁力耦合效应，可以导致磁滞伸缩带的磁导率变化。这种装置的问题在于正常的热膨胀可能使传感器达到饱和，这可以通过与高黏度流体复合来克服，但这样就只能局限于交流使用。

采用磁致伸缩材料作为声学波导管，可以制成位置探测器。装置包括沿波导管将靶和铰链相连的永磁体、沿波导管吸收声波的吸收端或发射脉冲的发射端、防止无关波反射的阻尼器。传感器通过将磁体与浮标连接，可以用于测量液位，一般情况下 50m 的精度可以达到 1mm。

2.6.2.3 磁场计

如果某磁致伸缩材料已知是磁场的函数，测量磁场的问题就可以简化为测量长度的问题。长度测量可以通过激光干涉仪、光导纤维、应变测试仪、电容器或其他测量材料，如压电复合材料等进行。与磁通量测试系统相比，根据 Villari 效应，采用 GMMM 和 PZT 复合的测量装置极限在 1Hz 下可以达到 6.9×10^{-6} A/m。

也可以采用磁滞伸缩薄膜与光导纤维复合制成磁场计。当传感器受到外加磁场影响时，磁致伸缩材料变形导致光导纤维也发生形变，从而纤维中激光束的途径也发生改变，并被干涉仪所测得。这种装置的最大灵敏度可以达到 160×10^{-6} A/m。

2.6.2.4 应力传感器

图 2.4-9 是一种磁力控制器横截面图和实物图。根据 Villari 效应，即材料应力和磁化的关系，采用晶态或非晶态磁致伸缩材料可以制成简洁易用的应力测试仪。包括两个磁致伸缩材料部件，其中一个围绕激励线圈，另一个围绕检测线圈，还有两条硬质横梁。有外力施加时，部件的磁致伸缩效应产生磁通量的变化，并按一定比例地由检测线圈测得。第二种操作模式为定磁通状态下，改变激励电压以便在感应线圈获得稳定的电压输出。激励电压的变化与施加应力的变化相关。与传统诸如基于应变的应力传感器不同，采用磁致伸缩材料的传感器更为简便、可靠，需要的电子附件也很少。

美国 ETREMA Products，Inc.（EPI）是世界上第一个生产商业用 Terfenol—D 的公司，成立于 1987 年。1995 年，他们采用改进的布里奇曼法生产 Terfenol—D，首先在陶瓷坩锅里融化，然后通过坩锅底部的孔倒入预热的模具中。模具从标准布里奇曼炉中二次炉部分取出。当材料凝固时，通过控制抽出速率和热流方向，可以生产出具有结晶取向的

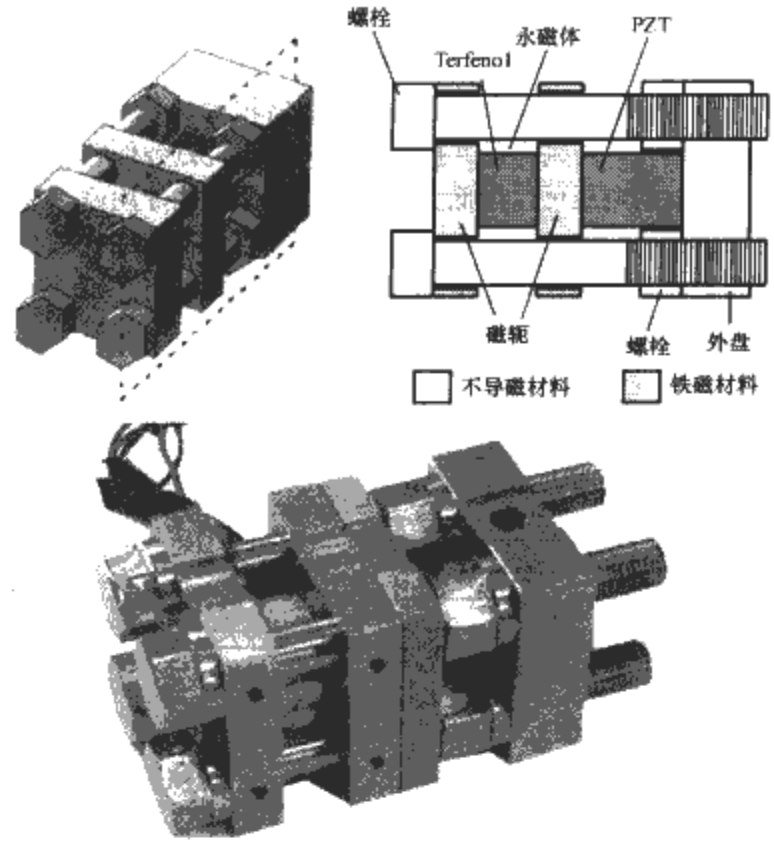


图 2.4-9 一种磁力控制器横截面图和实物图

Terfenol-D 棒材。ECG 系统（ETREMA Crystal Growth system）可以生产直径 65mm 长度 175mm 的棒材。对于直径小于 50mm 的棒材，该系统的最大取向长度可以达到 250mm。另外，该系统也可以同时生产多根直径小于 28mm 的棒材。

3 磁光存储材料

3.1 磁光存储技术的发展进程

可擦写光学记录媒质主要有两种：利用相转变效应的媒质（如 CD-RW）和利用磁光效应的媒质。随着高清晰度电视（HDTV）的发展，为达到多媒体、高画质量影响的需求，录制 133min 影片的容量就需 25GB，而未来 3D 影片的需求容量要 100GB 以上，故需要不断提升记录密度及容量。

在磁场或磁矩作用下，物质的电磁特性（如磁导率、介电常数、磁化强度、磁畴结构、磁化方向等）发生变化，使通向该物质的光的传输特性也随之发生变化，称为磁光效应。与相转变记录材料相比，最大的不同在于加热的同时施加了磁场。

磁光记录（Magneto-optical Recording）利用磁热记录和 MO 读出技术，最早由 Chen D 等在 MnBi 薄膜中于 1968 年发现，具有垂直磁化和大磁光效应，但由于当时其他相关技术如半导体激光器等还未发展成熟，故无法投入实际应用。随着新记录材料即稀土—过渡金属非晶合金的发现和随后光学盘片技术的发展，第一代 MO 驱动器在 1988 年投入正式使用。图 2.4-10 是 CD、DVD、BD（蓝光）光学系统的激光点大小和记录密度关系示意图。

3.2 磁光存储的物理基础和对材料性能的要求

3.2.1 磁光存储原理

作为热模式光学记录技术之一的热磁技术，最早由 Williams 等提出。MO 记录技术将激光能量作为加热源，在写入过程中，同时施加热能和磁场，MO 材料的磁化方向改变。当小区域内磁介质加热到居里温度时，该部分的自发磁化强度 M_s 变小，矫顽力 H_c 也显著减少，故介质就容易磁

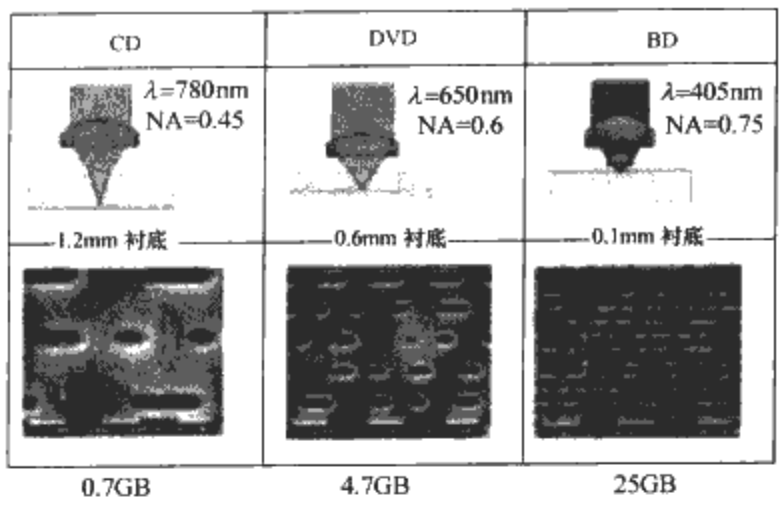


图 2.4-10　CD、DVD、BD（蓝光）光学系统的激光点大小和记录密度关系示意图

化。图 2.4-11 是热磁记录原理示意图。

在热磁记录过程中加热以改变磁化方向的场强，比只采用磁场达到相同目的时小得多，这是 MO 记录的优点之一。

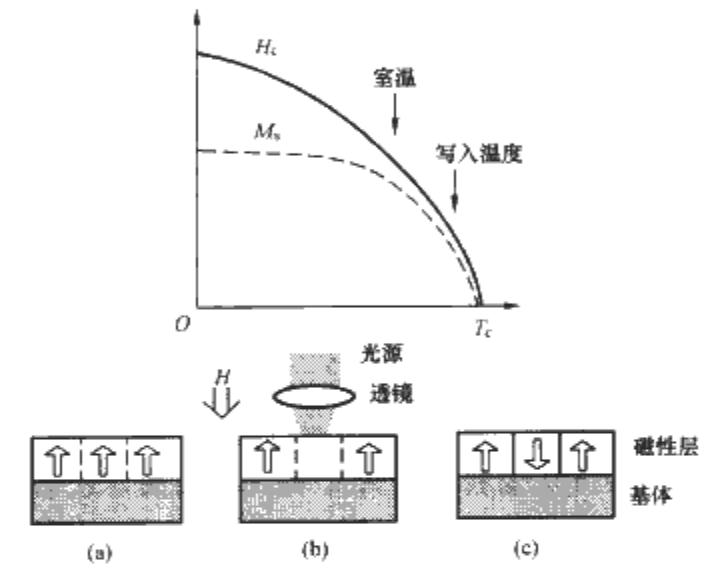


图 2.4-11　热磁记录原理

(a) 写入前；(b) 写入中；(c) 写入后

3.2.2　磁光记录读出原理

MO 记录系统采用 MO Kerr 效应，光头同时用于写入和读出。通常入射光为线性偏转，从磁性介质表面反射光的极化方向有一定程度的偏转，根据 MO 介质的 Kerr 效应通常在 1 度或更少。偏转光在旋转面分裂以光强度的变化表现，并由光电二极管检测。图 2.4-12 是 MO 磁头的结构示意图。

MO 的 Kerr 效应包括电子到中子的角动量转换，同时有电子的光学转变发生。在旋转极化介质上通过轨道自旋作用产生 Kerr 效应。当电子自旋方向与中子自旋方向（平行于光传播方向）平行时，Kerr 效应最易于检测。同时要求

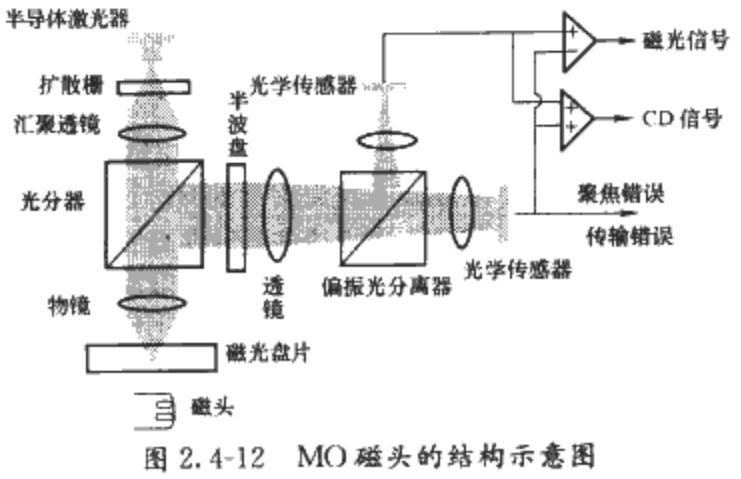


图 2.4-12　MO 磁头的结构示意图

介质的磁化方向与薄膜面垂直。具有大垂直磁各向异性的磁性薄膜适于作为磁介质。噪声信号与读出信号的比例原则上由 Kerr 旋转角的大小决定。当截至噪声在读出信号中占据主导时，理论上信躁比如下式所示：

$$\frac{S}{N}=\left(\frac{\eta}{2Bh_\nu}\right)^{\frac{1}{2}}(RI_0)^{\frac{1}{2}}\sin 2\theta_k \qquad (2.4\text{-}8)$$

式中：h_ν 为光子能量；η 为探测器的量子效率；B 为探测的带宽；R 为介质的反射率；I_0 为探测光的能量。

3.2.3　对磁光存储材料的基本要求

在传统的磁盘存储系统中，媒介为沉积于平面的磁性薄膜，MO 记录媒介必须满足以下物理特性：

(1) 受聚焦激光照射时，高矫顽力急剧减弱。

(2) MO 效应足够大以读出磁记录。

(3) 磁晶各向异性足够大以使磁矩垂直薄膜面并获得矩形的磁滞回线。

(4) 适合的光吸收与反射特性。

(5) 没有导致读出噪声的光学和磁非均匀性。

(6) 对读出和写入加热过程的热稳定性。

(7) 化学稳定性并适合在多种场合实际应用。

(8) 高效、生产成本低。

类似计算机用软盘，磁光记录媒质通常做成 5.25in 和 3.5in 两种，双面有硬壳保护，TDK 生产的磁光记录媒质如表 2.4-4 所示。

表 2.4-4　　TDK 商用磁光记录媒质

盘片大小 (in)	容量	价格（美元/片）
5.25	2.3 GB	44
	2.6 GB	44
	4.1 GB	64
	4.8 GB	64
3.5	128 MB	10
	230 MB	10
	540 MB	15
	1.3 GB	34

注　1in=2.54cm。

3.3　磁光存储材料

单轴磁各向异性和易磁化轴垂直膜面，即垂直磁各向异性，是 MO 媒介的必要条件。目前，满足以上基本使用要求，可用作磁光记录的材料如表 2.4-5 所示。

表 2.4-5　　主要的 MO 记录材料

材料		晶体结构	沉积方法	退火温度 (℃)	居里点 (℃)	矫顽力 (10^5 A/m)	Kerr 角 (°)
金属	MnBi	六角晶	真空蒸发	300	360	2	0.6 (633nm)
	MnCuBi	立方晶	真空蒸发	400	180	1～2	0.43 (830nm)
	PtCo	四角晶	溅射	600	400		
	TbFeCo	非晶	溅射	室温	150～250	4	0.2 (830nm)
	Pt/Co	立方晶	真空蒸发	室温	250～300	1	0.36 (410nm)
氧化物	BiDyIG	石榴石	热分解	500～600	250	2	
	Co-ferrite	尖晶石	热分解	500～600	0.9		

材料可以分为金属和氧化物，或晶体和非晶材料。一般地，由金属或氧化物组成的晶体薄膜表现大的磁光效应，但晶化过程需要更高的温度，故需要热稳定衬底，同时由于热处理导致晶粒长大形成更多的晶粒噪声。另一方面，非晶膜和金属多层膜能够在室温下沉积在衬底上，故阻碍了晶粒长大并导致低晶粒噪声。

3.3.1 稀土—过渡族金属非晶态材料

1973 年发现了新的稀土过渡（RE-TM）非晶金属材料，RE-TM 薄膜具有的垂直磁各向异性超过 10^6 erg cm^{-3}，因此表现出强垂直磁化，可以作为磁泡和 MO 记录介质。与晶体材料相比，由于光学非均匀性，非晶 Gd—Co 薄膜表现出非常小的媒介噪声。与先前的多晶磁薄膜相比，有了巨大的飞越。

RE-TM 薄膜通常是通过溅射在水冷衬底上制备。薄膜通常含 20%～30%的稀土，具有非晶结构，如基于 Tb-Fe 的三元或四元合金。在 RE-TM 薄膜中，RE 的自旋和 TM 的自旋通过反铁磁机制互相耦合，同时按照 Hund 规则，稀土元素的轨道动量和自旋动量耦合。MO 记录介质的非晶薄膜通常由重稀土和过渡金属组成，成分靠近所谓的补偿点，此时稀土和过渡金属的磁矩接近补偿，净磁矩很小。该组分下即使垂直各向异性能相当小，也能得到具有良好剩磁比的垂直磁化薄膜。

温度与自发磁化关系是 MO 记录介质最关键的参数。对于稀土—铁双合金，居里温度很大程度上受稀土元素和过渡金属种类的影响。这与稀土原子和过渡原子的相互作用有关，并正比于稀土自旋的数量级。为加强各向异性，通过简单堆砌非常薄的原子层来制造人工单轴结构是有效的。在 RE-TM 薄膜中，MO 效应似乎起源于稀土和过渡金属原子间的极化。大致上，过渡金属的在近红外区域占主导，稀土在远紫外区域占主导。该趋势可以通过在非晶合金的 MO Kerr 旋转的光谱区得到证实。

在所有材料中，TbFeCo 最适合作为 MO 介质，在长波段数值大小合适，但在短波段数值变小。相反，机械强度软而不适合记录介质的 GdFeCo，在短波段效应较大。因此，与机械强度硬的材料复合后，GdFeCo 材料适合于 MO 读出材料。

3.3.2 金属合金铁磁性磁光多晶薄膜

多晶薄膜的困难通常是在生长阶段出现。为获得良好的晶体结构和择优取向，通常需要高温退火，但这样往往导致大晶粒生长，由于大晶粒导致的介质噪声通常使光学介质退化。

采用金属多层膜可以部分解决以上问题。1985 年，Carcia 等发现 Pd/Co 多层膜具有大磁晶各向异性并能获得垂直磁矩。进一步研究发现，Pt/Co 多层膜也表现出垂直磁矩并在短波段表现大 MO Kerr 效应。大垂直磁各向异性被认为起源于 Co 和贵金属层的界面。这可以从随着 Co 层厚度 t_{Co} 的减少，单位区域有效磁晶各向异性 $K_{eff}\,t_{Co}$ 线性增加。当薄膜沉积于室温衬底时，多层膜表现出垂直各向异性，晶粒直径为 10nm 左右，对于目前记录介质已经足够小了。Pt/Co 多层膜是目前蓝光和紫外光 MO 介质的选择之一。在 RE-TM 膜中，各向异性也可以通过引进多层膜结构得以加强。EXAFS 实验表明，当双层膜厚达到 1nm 时，相邻原子的取向最显著，各向异性最强。

3.3.3 氧化物系列磁光存储薄膜

由于具有高居里温度、大磁晶各向异性、适合的磁化强度、良好的化学稳定性和大 Kerr 和 Faraday 旋转角，Co 铁氧体薄膜被认为是有希望的高密度磁记录和磁光记录媒介之一。相应的制备方法包括溶胶凝胶、旋转喷涂、化学气相沉积、分子束外延和脉冲激光沉积等。

Co 铁氧体薄膜的磁性能受晶粒大小、表面粗糙度和织构等结构参数影响很大。J. H. Yin 等采用 PLD 和原位加热法在（100）SiO_2 衬底上制得 Co 铁氧体薄膜，具有明显的垂直各向异性，垂直矫顽力达到 8.9k Oe。高垂直矫顽力可能与晶粒接近纳米晶、晶格应力大、表面平滑和结构织构有关。

由于氧化物的居里温度达到 520℃，难以满足普通商业化磁盘采用低成本激光源，写入温度只能在 150～250℃的需要。故采用 Mn^{3+} 等掺杂以降低 Co 铁氧体薄膜的居里温度。一般而言，一些合金和氧化物中的 RE^{3+} 离子可以增强磁光 Kerr 效应，并降低居里温度。另一限制在于多晶结构导致的大内禀介质噪声，但采用纳米晶结构氧化物薄膜可以有效降低介质噪声。

3.4 未来磁光记录技术的发展

3.4.1 近场记录

光学记录的密度由聚焦激光束的大小决定，由于衍射关系，受限于 $\lambda/2NA$。这就限制了光学记录系统的密度，特别是读出过程。因此近年发展了近场光学技术（near field）以避免绕过限制。

一种方法是通过比衍射孔径更小的微孔成像以突破限制。当微孔非常接近记录介质时，光斑就和微孔大小相当。Betizig 等利用尖头包覆 Al 层的光纤，可以获得图像模式下分辨率为 30～50nm 和记录模式下分辨率 60nm。但利用这种方法需要解决光学效率和数据率低的问题。

另一种方法是利用由 Kino 等发明的固体遮掩透镜（Solid Immersion Len，SIL）方法。SIL 是一块具有高透光性的椭球玻璃，放置于物镜和样品之间。由于 SIL 的高透光性和在球体内表面折射引起的 θ_{max} 增加，SIL 底面的光斑大幅度减小。通过该方法，Terris 等将直径 780nm 的激光缩小到了 317nm，并读写了 350nm 直径的磁畴。通过空气轴承滑块，它们达到了 3.8×10^6 bits/mm^2 和读写速度 3.8×10^6 bits/s。

3.4.2 混和记录

混和记录方法组合了热磁记录和利用磁阻头的磁通变化读出机理。在提高记录密度方面，愈来愈小的磁颗粒使传统磁记录方法必须解决热稳定性问题。为提高热稳定性，就必须强化记录介质的磁硬化，这使需要的磁场大大超过通常磁体所能提供的磁场。相反，热磁记录就无需高磁场。因此混和记录也可以称作热辅助记录。随着巨磁电阻（GMR）的发展和应用于硬盘磁头，该记录方法逐渐成为现实。巨磁电阻不但具有高灵敏度，而且在 100nm 下仍具有高侧向分辨率。

记录区和产生密度受温度曲线，特别是区域内温度斜率影响。磁道长度方向的读出分辨率由 GMR 磁头的结构决定。Katayama 等采用读取时用聚焦激光束加热读出区域的方法。加热状态下，补偿点在室温附近的 RE-TM 薄膜的磁化强度大幅度提高。因此，可以得到高的读出信号。如果磁头的宽度比激光光斑大，激光加热对提高磁道宽度方向的记录密度也是有利的。另外，Saga 等尝试了利用交互耦合双层膜来读出信号。读出层在室温下具有高磁化强度，并与具有高居里温度和高室温矫顽力的记录层耦合。

图 2.4-13 是采用 SIL 的 MO 磁头示意图，图 2.4-14 是

采用光学记录和 GMR 读出的混和记录系统示意图。

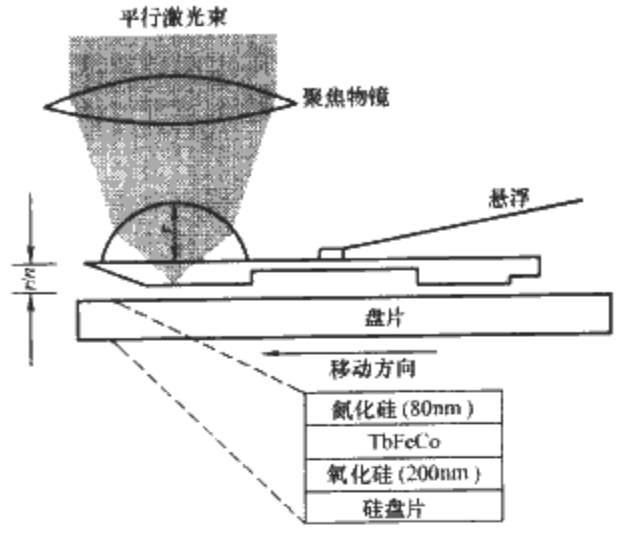


图 2.4-13　采用 SIL 的 MO 磁头示意图

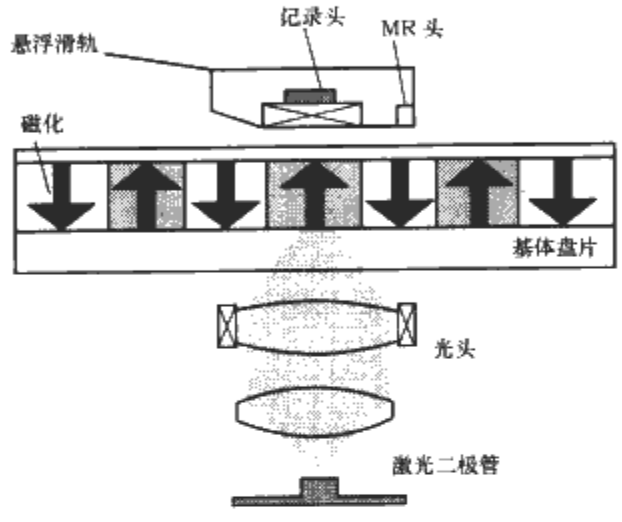


图 2.4-14　采用光学记录和 GMR 读出的混和记录系统示意图

4　巨磁电阻材料

磁电阻 MR（Magnetoresistance）效应是指铁磁性金属的电输运性质在磁场作用下发生改变的现象。1857 年，W. Thomson 发现了铁磁多晶体的各向异性磁电阻 AMR（Anisotropic Magnetoresistance）效应。1988 年，法国巴黎大学物理系 Fert 教授领导的研究组在 Fe/Cr 多层膜中观察到了电阻率变化超过 50%的巨磁电阻 GMR（Giant Magnetoresistance）效应，这种效应比各向异性磁电阻的变化率要高一到两个数量级。这一发现立即引起了全世界科研工作者的兴趣。随后，人们又在“铁磁金属/非磁金属”的颗粒膜中发现类似的巨磁电阻效应。1994 年，在钙钛矿结构的 LaCaMnO 中发现了特大磁电阻效应。1995 年，在 Co—Al—Co 颗粒膜中又发现了较高的隧道磁电阻效应。巨磁电阻薄膜以其优良的磁学性能和巨大的实用价值而迅速地从实验研究转向实际应用。1994 年，IBM 公司利用具有巨磁电阻效应的多层膜金属制成高密度读写磁头，将磁记录密度提高了几十倍。近年来，随着对 GMR 的进一步研究，信息存储技术有了飞速地发展，到 2005 年计算机硬盘的存储密度已达到 80Gb/in^2。

磁电阻效应通常有两种定义：

$$MR = \frac{\rho(0) - \rho(H_s)}{\rho(0)}$$

$$MR = \frac{\rho(0) - \rho(H_s)}{\rho(H_s)}$$

式中：$\rho(0)$、$\rho(H_s)$分别为零场和饱和磁场下的电阻率。

巨磁电阻效应是在磁性/非磁性多层膜交叠结构中的一种量子力学效应，当不同铁磁层的磁矩之间相互平行时，载流子自旋相关的散射截面小，材料表现低阻态；当不同铁磁层磁矩相互反平行时，载流子自旋相关散射截面大，表现高阻态，如图 2.4-15 所示。

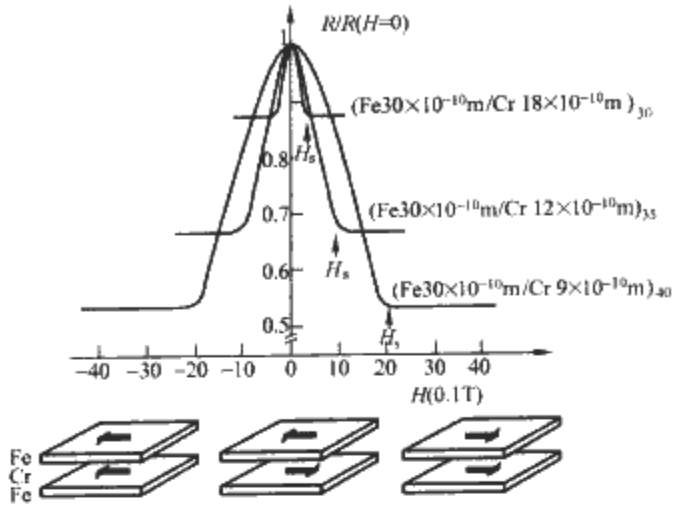


图 2.4-15　4.2K 温度下 Fe/Cr 多层膜磁电阻与磁场关系

4.1　巨磁电阻材料类型及其特点

衡量巨磁电阻材料性能的基本参数：

（1）高 GMR 效应。

（2）低工作磁场，即高灵敏度。

（3）高稳定性。

目前已发现的几类 GMR 材料各有特点，主要有过渡金属多层膜、自旋阀、纳米尺寸颗粒膜、磁性隧道结和氧化物超巨磁电阻薄膜五类。这五类主要的 GMR 材料性能比较如表 2.4-6 所示。

4.1.1　过渡族金属多层膜巨磁电阻材料

过渡族金属多层膜 GMR 材料的研究始于 1988 年，当时法国 Fert 教授领导的研究组对在（100）GaAs 基片上用分子束外延（MBE）生长的单晶（100）Fe/Cr/Fe 多层膜和（Fe/Cr）超晶格结构的电子输运性质时发现，当 Cr 层厚度为 9×10^{-10}m 时，在 4.2K 温度和 159kA/m 外磁场作用下，相邻铁磁层磁矩平行排列，此时沿膜面内的电阻率下降至不加外磁场时的一半，即磁电阻效应高达 100%，随后的实验结果进一步表明（Fe/Cr）超晶格在 1.5K 时磁电阻可达 220%。20 世纪九十年代初，Parkin 等人发现用较简单的溅射方法制备的过渡族金属多晶多层膜同样具有巨磁电阻效应，其中多晶（Co/Cu）多层膜的巨磁电阻效应尤为突出，在 4.2K 和室温下 GMR 值分别为 130%和 70%，而且饱和磁场仅需 80kA/m。

表 2.4-6　　各类 GMR 材料性能特点比较

	GMR 值	外加磁场	灵敏度	应用情况
多层膜	小	大	低	难
自旋阀	小	小	高	增大 GMR 值
颗粒膜	大	大	低	降低饱和场
隧道结	大	小	高	抑制巴克豪森噪声
氧化物	大	极大	低	难

研究结果表明，过渡族金属多层膜产生巨磁电阻效应的必要条件有以下几点：

（1）相邻磁性层具有反铁磁性耦合。

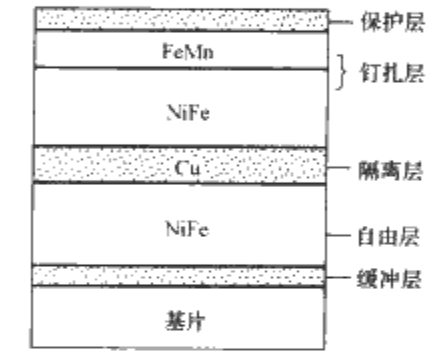
（2）单层膜厚度远小于传导电子的平均自由程。

（3）自旋取向不同的电子在磁性原子上的散射差别很大。

金属多层膜的巨磁电阻效应很大，在室温下可达10%～80%，但其相邻铁磁层间的交换耦合很强，导致实现GMR效应的饱和磁场也很大，约8～159kA/m，从而使其灵敏度较小，仅为0.4π%/（kA/m），这显然不能满足实用化要求，限制了其实际应用。

4.1.2 自旋阀巨磁电阻材料

自旋阀是目前实用的多层膜巨磁电阻材料，与过渡族金属多层膜巨磁电阻材料相比，自旋阀结构通过在相邻的铁磁层中引入非磁性层，使相邻的铁磁层不存在（或很少）交换耦合，从而显著地降低了饱和磁场值，提高了灵敏度。典型的自旋阀结构一般主要包括自由层、隔离层、被钉扎层和反铁磁层等。对于自旋阀结构来说，被钉扎层与自由层之间的磁耦合很弱，因此需要很小的饱和磁场即可改变自由层的磁矩方向，而不改变被钉扎层的磁矩方向，从而实现GMR效应。自旋阀结构电阻的大小取决于两铁磁层自旋的相对取向，故而称为自旋阀。图2.4-16所示是自旋阀结构示意图及其磁电阻与磁场响应曲线。该结构中铁磁层 $Ni_{80}Fe_{20}$ 被 $Fe_{50}Mn_{50}$ 层钉扎，另一 $Ni_{80}Fe_{20}$ 层被非磁性隔离层Cu分隔。为了防止 $Fe_{50}Mn_{50}$ 层氧化，一般需要镀保护层。



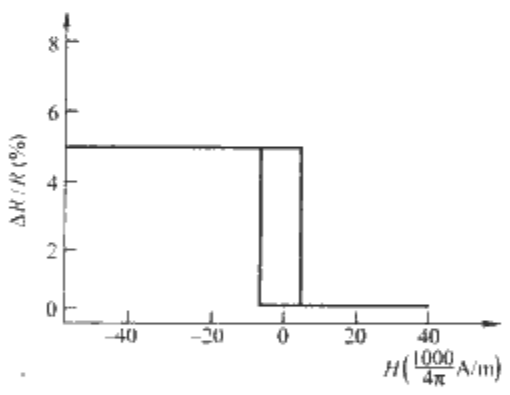


图2.4-16 自旋阀结构示意图及其磁电阻与外磁场的响应曲线

自旋阀具有如下优点：磁电阻变化率对外场变化呈线性响应，频率特征好；工作磁场小，灵敏度高；电阻随磁场变化迅速，磁滞较小；利用层间转动能动有效抑制Barkhausen噪声，信噪比较高。因此，在巨磁电阻材料中，它首先进入了实用化阶段，广泛地应用于巨磁电阻传感器，尤其是计算机读头领域。但美中不足的是它的GMR值相对金属多层膜巨磁电阻材料较小。另外，抗腐蚀和热稳定性问题也是自旋阀巨磁电阻材料亟待解决的问题，目前的解决途径是提高反铁磁层的电阻率、抗腐蚀性和热稳定性。

4.1.3 颗粒膜巨磁电阻材料

颗粒膜巨磁电阻材料是指纳米尺寸的铁磁性金属（如Co，Fe等）颗粒分布在非磁性金属（如Ag，Cu等）薄膜中所构成的复合材料体系。1992年，A. E. Berkowitz和J. Q. Xiao等分别发现在Cu-Co合金的异质颗粒膜（Heterogeneus Granular Film）上具有GMR效应。一般认为，颗粒膜GMR效应来源于传导电子在磁性颗粒与非磁性基体边界处的自旋相关散射。颗粒膜的研究主要集中在以Cu，Ag为基体与Fe，Co，Ni及其合金所构成的两类颗粒膜系列上。其中以Co-Ag体系最高，在液氮温度可达55%，室温下可达20%。

多层膜和颗粒膜的分类并不严格，由于制备工艺的影响，可以使这种分类变得模糊化。如，在某些场合下，颗粒膜内的局部区域会出现类似多层膜的微结构。相反，对于多层膜，经退火后也会形成不连续的多层膜，这时也可以看成是一类颗粒膜。甚至在具有条纹状磁畴结构的Co单层膜上也会出现与多层膜和颗粒膜相似的GMR效应。

与多层膜GMR材料相比，颗粒膜GMR材料的优点是制备方便，一致性好，重复性高，成本低，而且热稳定性较好。缺点是饱和磁场通常高于多层膜GMR材料，导致其磁场灵敏度较低，限制了其应用范围。

另外，1994年，S. Jin等发现，颗粒膜的另一种变形，即块体Cu-Fe-Ni合金，经过固溶化—淬火—后处理—失稳分解（spinodally decomposed）或形变加工，引入调制的、高度弥散的两相（富Fe，Ni的颗粒相和Cu基体）结构，局域地类似多层膜（超晶格），其GMR高达9%，Hc为45Oe，存在一最佳颗粒度。这类材料的工艺相对于超晶格更加简化，成本低，易于商品化。其GMR效应的机理类似于多层膜或颗粒膜。

4.1.4 磁性隧道结

所谓磁性隧道结是指两个铁磁金属（如Cr、Co、Ni或FeNi）膜之间夹一层10～40nm厚的绝缘薄膜的FM/I/FM结构。在垂直于膜面的电压作用下可以有隧穿电流，其电流和电阻依赖于两铁磁层中磁矩夹角。当两铁磁层的矫顽力不同或其中一层被钉扎时，通过施加外场可以改变两铁磁层磁矩的相对取向，获得GMR效应，这一效应通常又被表示为隧道结巨磁电阻TMR（Tunneling Magnetoresistance）。由于磁性隧道结两铁磁层间不存在或基本不存在层间耦合，因而只需要很小的磁场即可使其中一个铁磁层磁矩发生反转，实现隧道电阻的巨大变化，故磁性隧道结比金属多层膜具有更高的磁场灵敏度，再加上其本身电阻率高，能耗小，性能稳定，所以磁性隧道结具有很大的应用潜力。

4.1.5 超巨磁电阻材料

超巨磁电阻又称为庞磁电阻CMR（Colossal Magnetoresistance）。CMR锰氧化物材料一般具有畸变的钙钛矿结构 ABO_3。化学分子式为 $RE_{1-x}AE_xMnO_3$，其中RE为三价的稀土金属元素（如 La^{3+}、Pr^{3+}、Nd^{3+}、Sm^{3+} 等），AE为二价的碱土金属元素（如 Sr^{2+}、Ca^{2+}、Ba^{2+}、Pb^{2+} 等）。CMR材料具有极高的磁电阻效应，1994年Jin等人报道在类钙钛矿氧化物陶瓷La-Ca-Mn-O薄膜中77K温度下CMR为127000%，280K下也达到400%。目前，理论上认为CMR材料的磁电阻材料来源于锰离子导电电子自旋和局域电子自旋间的强烈耦合作用。

4.2 巨磁电阻材料的制备技术

4.2.1 多层膜结构GMR材料的制备

巨磁电阻多层膜是所谓的“三明治”结构，工艺上要求相同金属层厚度相同，每层生长均匀、纯净，周期性严格。多层膜制备技术一般包括物理气相沉积PVD（Physical Vapor Deposition）和化学气相沉积CVD（Chemical Vapor deposition）。常用的物理气相沉积方法有溅射法、分子束外

延、脉冲激光沉积等。CVD 方法包括金属有机化学气相沉积、微波电子回旋共振化学气相沉积、直流电弧等离子喷射化学气相沉积和触媒化学气相沉积等技术。但应用最广泛的技术为溅射法与分子束外延法。

4.2.1.1　分子束外延技术

分子束外延技术是在真空镀膜技术的基础上发展起来的，它是在合适的条件下，沿衬底材料晶轴方向一个一个地沉积成一层结晶结构完整的新单晶层薄膜的方法。利用这种方法可以生长极薄的单晶薄层，而且能够精确控制膜厚、组分和掺杂物。其局限性在于对衬底材料要求较高（要求外延材料与衬底材料的晶格结构和原子间距相互匹配，晶格失配不超过 7%），成膜速度慢，成本高，因此主要应用于 20 世纪 50 年代开始的巨磁电阻薄膜的早期研究以及现代研究中的单层打底行为。

4.2.1.2　磁控溅射

磁控溅射法溅射出的粒子大多呈原子或原子簇状态，十分有利于薄膜尺寸的控制，可获得外延膜，沉积温度较低，适用于不同靶材，因而得到极为广泛的应用。利用磁控溅射法不仅可以制备出晶体结构的薄膜，而且成膜速度很快（400～1000nm/h），并且磁控溅射合金成分较真空蒸镀法容易保证，薄膜与基片间附着力较大，多晶取向倾向大；不足之处在于沉积过程中会引入部分气体杂质，不能对强磁性材料进行低温高速溅射。

4.2.2　颗粒膜结构 GMR 材料的制备

颗粒膜结构与多层膜结构的 GMR 材料有许多相似之处，两者均属于复相非均匀体系，所不同的是纳米颗粒在颗粒膜中呈随机分布，而多层膜具有人工周期结构。因而颗粒膜的制备方法比多层膜简单，颗粒膜的常用制备方法有共蒸发、共溅射、溶胶—凝胶法、化学气相沉积和化学电沉积等。物理方法以溅射法为主常采用射频或磁控溅射、离子束溅射等方法。溅射靶可采用相应化学组分的混合均匀粉末加压成型获得，或以适当方式将不同材料的片（块）组合成镶嵌的复合靶，通过调节靶上不同组成的相对面积比例，控制颗粒膜中铁磁相的结构得到颗粒分布均匀、尺寸合理的颗粒膜。基片温度、溅射率、气氛、制备后的热处理等都会影响颗粒膜微结构，一般要求真空度尽可能高，基片温度要合适。基片温度较低时，颗粒尺寸小，甚至可生成亚稳态固溶体；基片温度较高时，利于颗粒长大，实现相分离。

4.3　巨磁电阻材料及其器件的应用

从实用角度来看，对 GMR 材料的主要要求是：

(1) 室温下具有尽可能高的 GMR 效应。

(2) 低的饱和磁场 H_s。

(3) 高的稳定性（如防潮解、耐腐蚀等）。

(4) 与传统制备工艺具有兼容性，成本低廉。

(5) 最好具有线性的磁电阻效应等。

4.3.1　巨磁电阻传感器

磁电阻传感器始于 20 世纪 70 年代，当时利用的是各向异性的磁电阻效应 AMR。磁电阻传感器是利用磁性材料的导电特性与其磁化状态的相关性制作的传感器。由于磁电阻传感器具有体积小、灵敏度高、抗恶劣环境等优点，被广泛地应用于汽车电子技术、机电一体化控制等领域。随着巨磁电阻材料的发展，GMR 多层膜、自旋阀等具有更大磁场响应范围和更高磁场灵敏度的先进材料的出现使磁电阻传感器的精准度和可靠性都得到了极大的提高，如表 2.4-7 所示。

表 2.4-7　适合于磁电阻传感器的典型材料的室温性能比较

	磁电阻比 (%)	饱和磁场 (mT)	磁场灵敏度 (%/mT)
AMR 磁性薄膜	2～3	0.5～2	~4
GMR 多层膜	10～80	10～200	~1
自旋阀	5～20	0.5～5	~10
磁性隧道结	30～70 (最新 355)	0.5～5	~40

实际应用中的巨磁电阻薄膜包括 $Co_{90}Fe_{10}/Cu$、$Ni_{81}Fe_{19}/Cu$ 等，而且为了提高 GMR 效应值往往在 NiFe、Cu 的界面插入 Co 薄层，这样制备的 GMR 传感器兼有较小饱和磁场和较大的磁电阻值。由于 GMR 薄膜系金属薄膜，电阻较小，如果直接将 GMR 多层膜材料或自旋阀材料作为传感器单元，必须有很大的工作电流才能得到足够的电压输出，而且功率消耗过大；若扩大单元尺寸则影响传感器空间分辨率。通常的做法是将 GMR 薄膜光刻成微米宽度的长条状或迂回状的电阻条，可将电阻增大至 kΩ 量级，使其在较小电流下即可得到合适的电压输出，亦可保证器件的空间分辨率。另外为了消除单一 GMR 电阻条中存在的与磁场无关的直流背景信号，实际应用中一般按照惠斯通电桥方式连接光刻刻蚀的四条尺度相同的 GMR 电阻条，如图 2.4-17 所示。

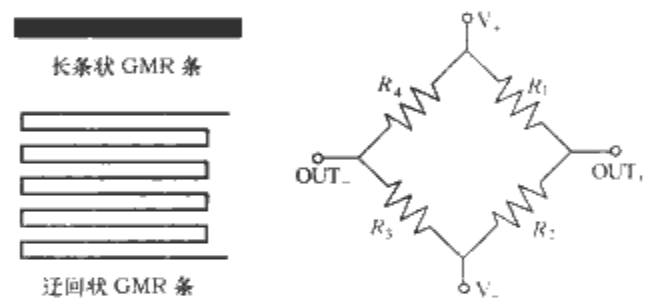


图 2.4-17　GMR 传感器的迂回状电阻条和桥式单元结构

4.3.2　巨磁电阻硬盘读出磁头

GMR 材料首先是作为计算机硬盘的读出磁头而被商业化应用的，目前的 GMR 磁头主要是使用 GMR 自旋阀结构（图 2.4-18 为某公司商用自旋阀磁头的基本结构图）。普通 AMR 磁头（如 NiFe 合金薄膜）的磁电阻效应不超过 5%，磁电阻变化灵敏度最大约为 0.4%，所需外磁场强度约400A/m，致使其磁记录密度受到很大限制，迄今为止获得的最高水平为 3Gbit/in²。而 GMR 薄膜材料在室温下 GMR 值可达 10%～30%，磁场灵敏度可达（13%～100%）/（kA/m），因而在超高密度磁记录读磁头上极具竞争力。1994 年 IBM 公司试验了第一款 GMR 自旋阀硬盘读头，随后 GMR 磁头进入市场并全面取代 AMR 磁头，使得硬盘记录密度以每年大于 60%的速度增加，同时磁头尺寸越来越小，如表 2.4-8 所示。

表 2.4-8　GMR 磁头的性能特征发展趋势

年份	存储密度 (Gbit/in²)	写入道宽 (μm)	读出道宽 (μm)	MR 间隙 (nm)	传感层厚度 (nm)
1995	1	2.50	2.00	300	15.0 (AMR)
1997	3	1.35	1.10	250	12.0 (AMR)
1998	5	1.10	0.70	200	9.0 (AMR)
2000	10	0.80	0.50	140	5.0 (GMR)
2002	20	0.55	0.35	100	3.5 (GMR)
2003	40	0.40	0.25	70	2.5 (GMR)
2005	80	0.28	0.18	50	1.8 (GMR)

注　1in=2.54cm。

图 2.4-18 某公司商用自旋阀磁头的基本结构示意图
(a) 整体示意图；(b) 侧截面图；
(c) 磁头气垫面方向视图

4.3.3 巨磁电阻随机存储器

目前广泛应用的随机存储器 RAM（Random Access Memory）多是 Si 集成电路组成的半导体动态存储器 DRAM 和静态存储器 SRAM，易丢失，抗辐射性差。而半导体非易失存储器如可擦可编程只读存储器（EEPROM），目前容量不大，抗辐射性能差，制作成本高。GMR 效应的发现导致了不易丢失、抗辐射 RAM 的存储器的飞速发展。与半导体 RAM 相比，MRAM 的优点是：非易失、抗辐射、长寿命和低成本。表 2.4-9 所示是 MRAM 与其他非易失 RAM 写入特性的比较。

表 2.4-9 几种非易失性存储器的写入特性比较

特性	FeRAM	EEPROM	Flash EEPROM	MRAM	PRAM
写入时间（μs）	0.1	1000～10 000	10～100	0.1～1.0	0.02
写入电压（V）	2～5	12～18	10～12	5	0.3
写入寿命（次）	10^{12}	10^4～10^6	10^5～10^6	很长	很长
写入能（32 位）（nJ）	0.5～1.0	1000	1000～2000	10～100	0.1

5 庞磁电阻材料

钙钛矿锰氧化物 $LaMnO_3$，在特定的掺杂条件和一定的温度范围内，系统的磁电阻远大于磁性多层膜的 GMR，大约高 3～4 个数量级，故称为庞磁电阻（Colossal Magneto-Resistance，CMR）效应。

对 $La_{1-x}A_xMnO_3$（A 代表二价碱土金属元素 Ca，Sr 或 Ba）亚锰酸盐系统的研究，始于 1950 年 Van Santen 和 Jonker，通过掺杂发现新的铁磁性金属相，而且表明系统的电性质与磁性质之间存在密切的联系。1954 年 Volger 首先在 $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$ 多晶样品中发现了负磁电阻效应。然后经过近四十年沉寂，1993 年 Helmol 等在 $La_{0.67}Ba_{0.33}MnO_x$ 铁磁薄膜中，发现室温下本征磁电阻可达－60%，超过了磁性多层膜的磁电阻效应。1994 年 S. Jin 等在 $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ 薄膜样品中观察到 MR_H 为 127000%的磁电阻比，由此开始了深入研究 CMR 锰氧化物的序幕。

5.1 钙钛矿锰氧化物的庞磁电阻效应

CMR 钙钛矿锰氧化物的通式为 $RE_{1-x}AE_xMnO_3$（RE=La，Pr，Nd，Sm，Eu，Ho，Tb，Y 等三价稀土元素或 Bi^{3+}；AE=Sr，Ca，Ba 等二价碱土元素或 Pb^{2+}）。该系统为强关联多电子体系，在电荷－自旋－轨道的自由度及电子－晶格之间包含能量相当复杂的相互作用，导致电荷、自旋和轨道的有序化、不稳定性、非均匀性及其与涨落之间的关联效应。由于这一体系易于通过能带填充和带宽两个主要参量的调制而改变其性质，另外还存在电子间的双交换、AF 超交换作用、磁性或位移极化子、静态或动态的 Jahn-Teller 效应等各种关联效应，导致轨道有序、电荷有序和轨道－晶格相互作用之间的竞争，使电子、磁性和结构等相图变得极为复杂。最近的研究表明，各种电子相之间的竞争在适当条件下产生不同尺度的相分离可能是导致 CMR 效应的主要原因。

5.2 CMR 效应的特点

钙钛矿锰氧化物的 CMR 效应与磁性多层膜 GMR 材料相比有很大区别，主要体现如下：

(1) CMR 效应发生在钙钛矿锰氧化物材料的载流子掺杂的特定浓度区域。

(2) CMR 效应为系统的本征属性，无论是单晶、薄膜或陶瓷多晶体。

(3) 通常在 T_c 附近，可以得到非常大的负磁电阻效应；一般情况下，最大的 MR 值随系统的 T_c 增加而降低。因此，锰氧化物系统的室温磁电阻不很高。

(4) MR 大多呈现各向同性，与电流和磁场的相对取向无关。

(5) 与多层膜 GMR 相比，锰氧化物 CMR 材料的驱动磁场很大。但锰氧化物的 TMR 效应可以弥补该方面的不足。

5.3 晶体结构

晶体结构的测定一般采用衍射方法，对于钙钛矿型锰氧化物，由于重原子的存在，X 射线衍射给出的氧原子的位置经常不够准确。因此，更多采用中子衍射来获得晶体结构和磁结构的信息。

CMR 钙钛矿锰氧化物具有钙钛矿型晶体结构，主要包括理想的和畸化的结构。当 Mn^{3+}/Mn^{4+} 比值为某些特定值时，有时会出现电荷有序现象，从而呈现各种超结构。因为各晶相的基态能量相近，故在很多情况下产生宏观的两相共存或者纳米尺度的相分离。另一方面，这也使得系统的结构对外界条件（如温度、压力、磁场、辐射、化学掺杂等）很

敏感，从而诱发各种相变。

决定系统晶体结构的因素主要有 3 种：

(1) 锰的价态，三价锰离子因其 JT 不稳定性决定了 MnO_6 八面体的形状，Mn^{3+} 的浓度可以通过异价元素替代或引入阳离子空位进行调节。

(2) 容忍因子，A 位离子的大小直接影响到 MnO_6 八面体的扭转程度，可通过同价离子替代或多个元素替代进行调控。

(3) 外界条件，改变温度、压力可导致相变。另外外加磁场、辐射等能够改变系统的电、磁状态，反之也能引发结构相变。

5.4　相互作用和磁结构

钙钛矿锰氧化物系统中存在各种相互作用。双交换作用能导致心自旋之间的铁磁关联以及载流子的自旋（完全）极化；心自旋之间的超交换作用使得相邻自旋倾向于反铁磁排列；静态协同 JT 效应产生轨道有序现象；位间库仑作用有利于电荷有序的形成。这些相互作用间的竞争以及系统的电荷、自旋、轨道、晶格自由度间的耦合使得系统呈现各种新颖的基态，包括轨道有序 A 型反铁磁体、自旋倾斜相、半金属铁磁相、其他各种自旋－电荷－轨道有序相以及相分离态。

5.5　锰氧化物系统的理论模型

5.5.1　双交换模型

Zener 在 1951 年提出了间接交换模型，即未充满 d 壳层间通过传导电子发生交换作用，用此模型可以定性地解释一些过渡金属及合金的磁性。接着该模型解释了用于新发现的混和价亚锰酸盐系统。作为传导电子的 e_g 电子在锰离子间跳跃时保持其自旋方向，由于 e_g 电子与 t_{2g} 电子存在强的洪特耦合，使得锰离子间的 t_{2g} 电子的局域自旋必须呈铁磁排列。相反，当相邻锰离子的磁矩呈反铁磁排列时，e_g 电子就不能发生跳跃。由此解释了系统的铁磁性与金属导电性之间的关联，也解释了 3d 电子完全自旋极化的实验结果。

由于钙钛矿结构中锰离子是被氧离子隔离开的，故 Zener 提出了“双交换机制”，即 e_g 电子从 $Mn^{3}+$转移到 O^{2-}，与此同时，O^{2} 的 2p 电子从 O^{2-} 转移到 Mn^{4+} 上，基于 $Mn^{4+}-O^{2-}-Mn^{4+}$ 之间的超交换相互作用将导致心自旋的反铁磁排列。

5.5.2　双轨道模型

双轨道模型将事实上的两个 e_g 轨道看成是一个轨道，在定性解释锰氧化物系统的铁磁性金属相上得到成功应用。但锰氧化物系统随着载流子的掺杂可以显示各种磁有序相，一些磁有序相还伴随着轨道有序化。因此忽略轨道自由度的双交换模型在解释轨道有序绝缘相等方面存在不足。由此 Millis 等强调了强的电子—JT 声子的耦合对锰氧化物系统的输运性质产生重要影响，通过此模型给出了系统的基态、低能激发态以及有限温度下的各种性质。

5.6　低温铁磁态性质

5.6.1　低温电输运性质

物质在低温下的电输运行为能反映出系统的低能激发态特征以及电子的散射机制。在各种电输运性质中，锰氧化物铁磁体的电阻率与其 CMR 效应关系密切。由于物质的电输运性质对于晶界、各种缺陷、磁畴间界等非常敏感，为了获得系统的本征特性，在实验上需要高质量的单晶样品。

锰氧化物铁磁系统的电、磁性质随温度变化。未掺杂的母体相为绝缘体，掺杂后根据掺杂量的不同，电阻率的变化和系统从三方（R 相）向正交（O 相）结构相变有关。当 T_c 与 T_s 非常接近时，出现一种奇特的磁致结构相变。

当温度较高时，零场附近电阻下降非常缓慢；温度较低时电阻一开始就下降得较快。当温度远低于 T_c 时，电阻几乎不随磁场的增加而变化。相应的磁化曲线显示出类似的变化规律，表明磁电阻与系统的磁化强度之间存在关联。

锰氧化物的铁磁体的霍尔电阻率与其他材料存在较大差别。在远低于 T_c 时，样品只显示正常霍尔效应；当温度低于 T_c 时，霍尔电阻率可以明显地分为正常部分和反常部分；当温度高于 T_c 时，很难将霍尔电阻率分解成正常分量和反常分量。

5.6.2　低温磁性质和热性质

锰氧化物系统的低温下金属导电性与系统的铁磁有序关系密切，多晶或薄膜的饱和磁化强度与约化温度的平方成正比，属于自旋波激发。

锰氧化物铁磁体在低温、长波下的自旋动力学类似一般的各向同性铁磁体。实验表明，锰氧化物铁磁体的自旋波隙非常小，上限约为 0.02meV，表明 CMR 锰氧化物可归属于各向同性软磁体。

不同锰氧化物铁磁体的电子比热系数区别不大，系统的电子关联作用或电子的质量增益效应并不明显。阳离子缺位的 $LaMnO_{3+\delta}$ 具有异常大的比热系数，即使对于铁磁绝缘体，都显示出零温线性项。

5.7　高温铁磁态性质

5.7.1　高温电输运性质

当系统温度明显高于居里温度时，磁关联几乎可以忽略，这时电子—晶格相互作用可能占据优势。对于宽带 LSMO 体系，当温度稍高于 T_c 时，表现出金属性导电行为。当温度超过 500K 时，样品的电阻率随温度的升高而下降，显示出类似半导体的行为。

当温度远高于 T_c 时，反常霍尔效应可以忽略不计，此时主要为极化子贡献，高温顺磁态具有极化子跳跃霍尔效应的符号反常。

5.7.2　高温磁性质

当温度足够高时（$T>2\theta_p$），系统的高温磁化率服从居里—外斯定律。当温度低于 $1.5\theta_p$ 时，磁化率明显偏离居里－外斯模型，可能存在自旋团簇效应。

高温顺磁态的电子自旋共振（Electron Spin Resonance，ESR）线宽随着温度的升高而增大，且趋于饱和。当温度明显高于 T_c 时，系统的自旋团簇发生退耦合。

5.8　锰氧化物系统的相分离

锰氧化物的基本相分离有四种：一为顺磁背景中出现铁磁团簇，一般出现在略高于 T_c 的温区中；二为铁磁基体中出现顺磁或反铁磁团簇，一般出现在略低于 T_c 的温区中；三为电荷有序绝缘相与铁磁金属相共存，一般出现在窄带电荷有序系统中；四为反铁磁基体中出现铁磁团簇玻璃态，一般出现在电子掺杂系中。某些特殊情况下，相分离系统为三相共存。

锰氧化物系统的相分离具有以下特点：

(1) 锰氧化物系统的相分离是个普遍现象，CMR 效应与相分离现象有密切关系。

(2) 锰氧化物系统的相分离可以分为两种类型：一是纳米尺度的微观相分离；二是亚微米或微米尺度以上的介观或宏观相偏析。

(3) 纳米尺度的相分离很可能与电子浓度的偏析有关。当锰氧化物的掺杂浓度低于最佳掺杂浓度时，容易导致纳米尺度的相分离；T_c 附近的相分离的尺寸也多半为纳米数量级。

(4) 亚微米尺度以上的相分离的各相一般不带电荷。一般出现在高于最佳掺杂浓度的锰氧化物中，分离的两相为铁磁金属相和电荷有序绝缘相。由于窄带系有利于电荷有序相的形成，因此更容易见到大尺度的相分离。

5.9 新型 CMR 材料

钙钛矿锰氧化物显示出 CMR 效应，具有潜在的应用前景。然而本征 CMR 现象在应用上存在固有缺点：一是需要外加很高的驱动磁场（几个 T）才能使电阻产生非常明显的降低；二是 CMR 效应仅在 T_c 附近比较明显，显示出对温度变化的敏感性；三是非常大的 CMR 效应一般出现在远低于室温的低温区。

20 世纪 90 年代的研究发现，某些多晶样品的驱动磁场远小于 T_c 附近 CMR 效应的驱动场，故称为低场磁电阻（Low field magnetoresistance，LFMR）效应。LFMR 主要来源于隧道磁电阻（Tunneling Magnetoresistance，TMR）效应，故比 CMR 效应更普遍。除锰氧化物的 LFMR 外，还有 Sr_2FeMoO_6 系、CrO_2、$Tl_2Mn_2O_7$、Fe_3O_4、$CaCu_3Mn_4O_{12}$ 等。

5.9.1 层状钙钛矿锰氧化物

一般地，钙钛矿型结构可以与岩盐型结构沿 c 轴相交（intergrowth）形成所谓的 Ruddlesden-Poper 系层状化合物，其中钙钛矿层与岩盐层的比例为 $n:1$（对于全钙钛矿结构，$n=\infty$），如 $La_{1-x}Sr_{1+x}MnO_4$（$n=1$）、$La_{2-2x}Sr_{1+2x}Mn_2O_7$（$n=2$）。

5.9.2 其他 CMR 材料

磁性半导体指包含磁性离子的一类半导体，磁性离子间一般以载流子作为媒介，产生磁性耦合。由于在 T_c 上系统一般呈半导体行为，故 CMR 锰氧化物可以看成一种广义的磁性半导体。作为磁性半导体的模型系统，主要有：①NaCl 型的稀土硫属化合物；②Th_3P_4 型的稀土硫属化合物；③尖晶石结构的铬的硫属化合物；④稀释磁性半导体（Diluted Magnetic Semiconductor）。如 EuX（X=O，S，Se，Te）系、$Gd_{3-x}\square_xS_4$（□为阳离子位）、$CuCr_2S_4$、$In_xMn_{1-x}As$、$Tl_2Mn_2O_7$ 系等。

5.10 锰氧化物 CMR 材料的应用

稀土掺杂的锰氧化物的特殊性质使其具有巨大的潜在应用价值。尤其是它的电子输运性质对磁场的敏感性、居里温度附近的金属—绝缘体转变、材料的电场极化和电子能带的半金属特性等都可能在电子学器件中得到应用。基于这些性质，锰氧化物在诸如磁场传感器、场效应器件以及自旋极化粒子注入器件中有着潜在应用前景。

锰氧化物一个很直接的应用就是利用其庞磁电阻效应制作磁场传感器。可以直接使用锰氧化物薄膜或多晶陶瓷制作传感器，也可以使用锰氧化物制作自旋阀和自旋隧道结，再利用这些器件来制作磁场传感器。然而，锰氧化物的庞磁电阻效应随着温度升高迅速减弱，在室温附近对磁场的敏感性很弱，不能满足实用上的要求。低场磁电阻效应研究以及磁隧道结的发明有望解决这一问题。目前基于锰氧化物的电场效应器件如磁隧道结、磁 p-n 结、基于锰氧化物的铁磁场效应管以及具有锰氧化物高温超导材料结构的自旋极化注入器件都得到了重要关注。

6 稀释磁性半导体材料

6.1 稀释磁性半导体材料

常见的半导体材料如：Si、Ge、GaAs、GaN、InP、ZnO、SnO_2、TiO_2 等是不具有磁性的，如果通过元素掺杂使半导体中引入过渡金属（或稀土金属）等磁性离子，由于磁性离子与半导体导带中电子的自旋交换作用（sp-d exchange），或者过渡金属离子之间的自旋交换作用（d-d exchange）可诱发这类材料产生磁性。这种在化合物半导体中，由磁性离子部分地代替非磁性阳离子所形成的新型半导体材料，称为稀释磁性半导体。需要强调的是，真正的稀释磁性半导体的磁性是磁性载流子的贡献，而并非来自于磁性团簇或磁性杂质等其他因素。

6.2 几种典型的稀磁半导体材料

为了追求在室温和低场驱动条件下实现自旋的有效注入以及自旋功能器件的开发需求，稀磁半导体材料的探索逐渐转向高居里温度点、较软的铁磁性能，以及与被注入半导体的电导和晶格要相互匹配的自旋注入稀磁半导体材料。迄今为止，依据平均场 Zener 模型有关高 T_c 稀磁半导体应溶有足够量的磁性离子和载流子的论断，国外学者已成功开发出有代表性的（$Ga_{1-x}Mn_x$）As（110K），（$Ga_{1-x}Mn_x$）P（270K）和（$Ga_{1-x}Mn_x$）N（940K）等，以及磁性掺杂的 n 型宽带隙的透明半导体 TiO_2、ZnO、In_2O_3 等氧化物材料。

6.2.1 (Ga，Mn) P

研究显示具有室温铁磁性的（Ga，Mn）P 可以通过离子注入和掺杂两种不同方法成功制备。N. Theodoropoulu 研究发现，约 6%（摩尔分数）Mn 注入到 p 型 C 掺杂 GaP 中，在 700℃退火条件下，测得样品居里温度为 270K，进一步研究发现，在相同条件下，Mn 被注入到 n 型 GaP 时居里温度明显降低（约 50K）。

Mn 也可以通过分子束外延（MBE）方法掺入到 GaP 中，可以经 PH_3 加热裂化获得 P 的同时，从 CBr_4 源中加 C 来控制 p 型掺杂，Overberg 总结出 MBE 生长条件下（Ga，Mn）P：C 相图，如图 2.4-19 所示。

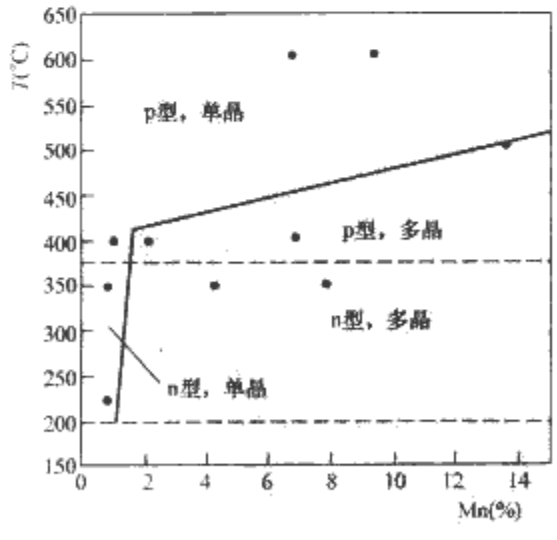


图 2.4-19 MBE 生长的(Ga,Mn)P：C

6.2.2 (Ga，Mn) N

有关（Ga，Mn）N 稀磁半导体的研究者众多，但很多学者并未得到室温铁磁性的（Ga，Mn）N，Gebicki 和 Zajac 分别

通过再升华法（resublimation）和热氨法（ammonothermal）获得（Ga，Mn）N 微晶，但磁测表明化合物呈顺磁性。而在 Al_2O_3 基片上用 MBE 技术生长的 GaMnN（650～750℃生长），磁测发现磁性来源于铁磁和顺磁两种相，且铁磁性并非来源于载流子调制的磁性。同样采用 MBE 技术，Sasaki 和 Sonoda 却生长出高居里温度的（Ga，Mn）N 薄膜，其居里温度 T_c = 940K，而且并没有发现高 T_c 的 Mn-Ga 和 Mn-N 化合物出现。N. Theodoropoulu 利用注入法在 3-5%Mn 掺杂的 p 型 GaN 也发现了铁磁性特征，只不过 $T_c \approx 250$K。值得强调的是纤维锌矿结构的 GaN 在 Al_2O_3 衬底上生长，由于 Al_2O_3 和 GaN 的热膨胀系数和晶格常数相差很大，长出来的外延层缺陷很多，这是（Ga，Mn）N 生长最大的问题和技术难关。另外这种材料在加工和刻蚀等方面也比较困难。表 2.4-10 是各类半导体氧化物材料结构与载流子特性。

表 2.4-10　各类半导体氧化物材料结构与载流子特性

混合物	晶体结物	单向电导率 (S/cm)	载体类型	最大灵活性 [$cm^2/(V\cdot s)$]	带隙 (eV)	最大载体浓度 ($1/cm^3$)
$CuAlO_2$	Hexagonal	1	P	10	3.5	1.3×10^{17}
$CuGaO_2$	Hexagonal	0.063	P	0.25	3.6	1.7×10^{18}
$SrCu_2O_2$	Hexagonal	0.05	P	0.5	3.3	6×10^{17}
$AgInO_2$	Hexagonal	6	N	0.5	4.2	2.7×10^{19}
ZnO	Hexagonal	20	N	200	3.2	1×10^{21}
In_2O_3	Cubic	10^4	N	30	3.75	1×10^{18}
Cd_2SnO_4	Orthogonal	10^4	N	40	2.7	
SnO_2	Tetragonal	10^4	N	10	3.6	8×10^{20}
TiO_2	Tetragonal		N	20-100	3.0	1×10^{19}
Cu_2O	Cubic		P	100	2.0	1×10^{17}

6.2.3　(Zn，M) O (M= Mn，Fe，Co，Ni)

宽带隙稀磁半导体成为研究热点，除了归功于 Dietl 根据 Zener 模型的预测有望获得高居里点以外，重要的因素还在于这类材料可在光发射二极管、激光二极管和自旋晶体管等自旋功能器件应用领域发挥特长。磷化物和砷化物基的材料能带间隙普遍小于 3eV，在这类材料中寻求更高温度下磁有序的半导体不太现实。过渡族金属掺杂的半导体氧化物因能带间隙普遍大于 3eV，室温霍尔迁移率可观而成为近期热门的话题。从表 2.4-10 中可以看出，六方晶系纤维锌矿结构的 ZnO 的直接能带间隙为 3.2eV，室温霍尔迁移率在 200 $cm^2V^{-1}s^{-1}$，电子的掺杂是由 ZnO 晶格中的 Zn 间隙形成的缺陷完成。引发 n 型掺杂的内禀缺陷层约在其导带下方 0.05eV 处。K. Sato 基于局域密度近似的第一性原理计算，若以 Fe、Co 和 Ni 掺杂的 n 型 ZnO，可能有助于高居里温度的稀磁半导体产生。依照其内部两状态的能量差 $\Delta E = E_{(\text{spin-glass state})} - E_{(\text{ferromagnetic state})}$ 来预测其铁磁性相稳定与否。图 2.4-20 表示 Mn 及 Co 掺杂 ZnO 的铁磁性稳定程度，横轴为载流子浓度，纵轴为铁磁态与自旋玻璃态的能量差。结果显示 Mn—doped ZnO 须 p—type 浓度大于某一程度时，才能显示出铁磁态。而 Co—doped ZnO 则在 n—type 下或零掺杂载流子时即可呈现铁磁态，Fe 和 Ni 也有和 Co 类似的结果。

图 2.4-20 是理论 Mn 和 Co 掺杂 ZnO 载流子浓度对铁磁相稳定的相对关系。T. Fukumura 利用脉冲激光沉积技术在 α—Al_2O_3（001）基片上生长出 Mn—doped ZnO，但没有铁磁性特征出现，而在 α—Al_2O_3（001）上生长出的 Co—doped ZnO 呈现出铁磁性特征，其居里温度为 280K，遗憾

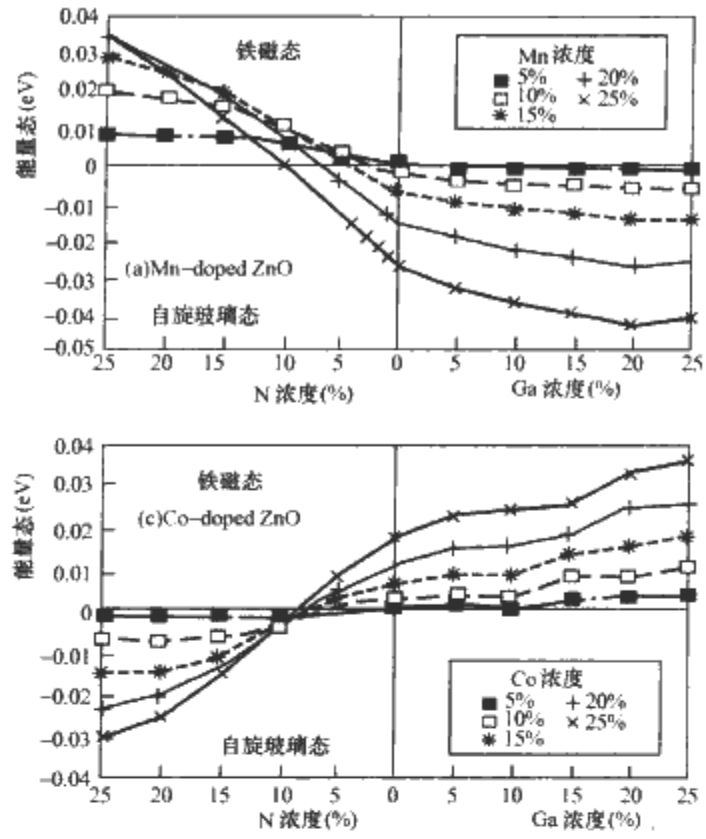


图 2.4-20　理论上 Mn 和 Co 掺杂 ZnO 载流子浓度对铁磁相稳定的相对关系

的是重复性较低。Ni—doped ZnO 薄膜只在低温 2K 下具有铁磁性，高于 30K 则转变为超顺磁行为。Fe—doped ZnO 薄膜同样在 α—Al_2O_3（001）上用 PLD 制成，居里温度为 295K，EXAFS（extended X-ray absorption edge fine structure）结构分析表明，Fe^{3+} 离子的掺入造成 ZnO 晶格的扭曲，Fe—doped ZnO 的磁性不是来源于铁的氧化物，Fe—O 之间键长 R_{Fe-O} 和配位数 N 与铁氧化物相矛盾，同样的理由证明其铁磁性也不会来源于锌铁尖晶石（franklinite）Zn-Fe_2O_4。有关（Zn，M）O（M=Mn，Fe，Co，Ni）稀磁半导体的磁性来源问题，至今仍在热烈探讨中。

6.3　基于稀磁半导体材料的自旋功能器件

由于稀磁半导体很大程度上考虑了静电势垒（界面电子结构的匹配问题）对自旋极化注入的不利影响，尤其是近期研究的透明半导体系列具有很多独特的磁光、磁电等性质，因此稀磁半导体在磁感应器、高密度非易失性存储器、光隔离器、半导体集成电路、半导体激光器和自旋量子计算机等领域有广阔的应用前景。近期广泛开展的稀磁半导体基的自旋功能器件研究表明，与传统的半导体器件相比，自旋电子功能器件具有以下优点：

（1）体积小，现今半导体集成电路的特征尺寸是几十纳米，但随着芯片集成度的提高，晶体管尺寸的缩小会引发漏电和器件发热等很多问题。而自旋功能器件的特征尺寸为几纳米左右，特别是改变电子的自旋状态所耗能量甚低，这就为开发微型自旋功能器件创造了条件。

（2）运行速度快，自旋功能器件的操控是基于磁性载流子自旋方向的改变以及自旋之间的耦合，每秒的逻辑操作可达上亿次。

（3）自旋功能器件操作具有非易失性，即当电源关闭后，自旋状态仍然保留不变直至下次开启，这种特性可以应用在高密度非易失性存储器件领域。

基于稀磁半导体材料的自旋功能器件可大致分成两类，一类是与自旋极化率密切相关的自旋功能器件；另一类是与自旋相位干涉有关的量子信息器件。

自旋二极管（spin diodes）是一类电和光特性依赖于载流子自旋极化的非均匀二端半导体设备。早期的自旋二极管是利用磁场作用下因塞曼劈裂使载流子自旋和复合中心自旋的取向变化而工作。近年来用稀磁半导体作为注入层的自旋二极管在加大 I-V 特征对自旋和磁场的灵敏度及促进自旋注入和监测等方面有了长足发展，Johnston-Halperin，Van Dorpe，Liu 等设计了磁性隧穿二极管（p-GaMnAs/n-GaAs p-n 结），成功实现了从铁磁性半导体向非磁性半导体的自旋注入。B. T. Jonker 则研制出自旋注入层/AlGaAs/GaAs/AlGaAs 量子阱/非磁性 p 型 GaAs 组成的发光二极管（spin-polarized light-emitting diode，简写成 Spin-LED,），完成了自旋的注入与监测。尽管在量子阱中自旋寿命相当短暂，但发射光的旋光特性可靠简单的改变注入层磁化状态而调控，因此 Spin-LED 可实际应用在集成化学传感器和极化编码的光学信息转移等很多场合。共振隧穿二极管（spin-dependent resonant tunneling diode，简写成 Spin-RTD 或 RITD）是在外置电场或磁场作用下经磁性相互作用、自旋一轨道耦合及量子限域等过程完成自旋注入和过滤的功能器件，特定条件下，Spin-RTD 可认为是一个理想的自旋阀。A. G. Petukhov 等设计了双势垒的 GMnAs/AlAs/GaAs/AlAs/GaMnAs 异质结和基于带间隧穿的 InAs/AlSb/GaMnSb/AlSb/InAs 异质结 Spin-RITD，这种结构可用于非易失性存储器或可再编程的逻辑门。除上述几种类型的功能器件以外，磁性单极二极管（只有施主或只含受主），特别是随后提出的磁性双极二极管（magnetic bipolar diode，MBD）（电子和空穴都参与载流子传输）是自旋二极管器件中的新成员，尽管其自旋电流和巨磁阻效应使器件具有诱人的应用潜力，但是一些诸如铁磁性半导体的遴选（保证有强的自旋—电荷耦合）、室温下大的交换劈裂、有效的磁性和非磁性结构的整合和小尺寸（小于自旋扩散长度）等苛刻条件是双极二极管设计所面临的挑战。

自旋基的晶体管是将自旋和电荷传输整合在传统的场效应和结型晶体管中的自旋功能器件。早在 1990 年 S. Datta 和 B. Das 就提出如图 2.4-21 所示的自旋场效应晶体管（Spin Field-Effect Transistor，SFET），源极和漏极为磁矩平行的铁磁性金属或半导体，分别执行电子的自旋注入和监测，FET 中的电导依赖于通道中的自旋取向，而自旋取向不是由外加磁场，而是由与漏极磁化有关的门电压来控制，实现自旋基的操作模式。当电子自旋与漏极中自旋同向（如图 2.4-22 上排），电子则可进入漏极，否则（如图 2.4-22 下排）电子自旋进动减慢，并发生自旋散射。但是在没有彻底改善下面列出的四项技术瓶颈之前，Datta-Das SFET 仍有待进一步探索：①是自旋极化载流子从铁磁性注入源真正注入二维电子气（2DEG）；②是自旋极化传输必须在消除界面不均匀性引起的杂散电场以实现弹道输运；③是自旋输运应可以由门电压有效控制；④是结构反演非对称性（structure inversion asymmetry，导致费米面的劈裂）应起支配作用，且自旋进动速率要足够大，使弹道输运时至少一半以上电子进动。

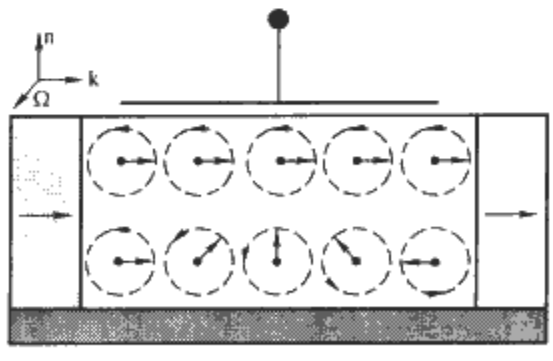


图 2.4-21 Datta-Das 自旋场效应晶体管示意图，
波矢为 k 的注入自旋极化电子沿准一维
InGaAs/InAlAs 异质结通道并垂直于 n 的平面作弹道输运

J. Fabian 通过串联两个磁性的 p-n 结得到如图 2.4-22 所示的磁性双极晶体管（Magnetic bipolar transistor，MBT），一个三端的自旋相关的放大器。磁性的基极材料可选用大 g 因子的磁性掺杂的或窄带隙半导体（使塞曼劈裂显著增强）。MBT 实质上就是一个磁性异质结晶体管，其电流放大功能依赖于发射极、基极和收集极能带结构的可调制性。

MBT 的优点是其能带结构不是内置固定的，可以通过磁场和自旋注入信号的操作来自如调制，但仍然存在类似磁性双极二极管制备时的苛刻条件。

自旋基晶体管的另一个成员是热电子自旋晶体管（Hot-electron spin transistor）。这类晶体管可以作为一个鉴别装置去表征与自旋电子学器件有关的自旋和能量相关的界面特性、散射过程和电子结构，另一方面，它也可在感应磁场、存储记忆和弹道热电子自旋注入等领域有极具潜力的发展空间。两个有代表性的例子是自旋阀晶体管和磁性隧穿晶体管。鉴于这类晶体管内部结构中很少采用稀磁半导体，因此此处不再详细介绍。

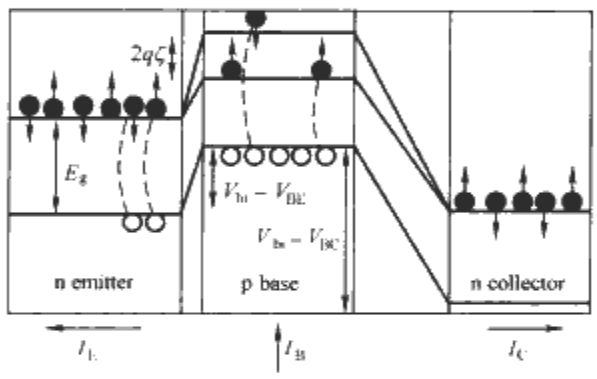


图 2.4-22 n-p-n 型磁性双极晶体管示意图
E—非磁性发射极；B—磁性基极；C—收集极；E_g—导带和价带之间能隙；$2q\zeta$—导带中自旋劈裂，导致平衡自旋极化 $P_{BO}=\tanh(q\zeta/k_BT)$

稀磁半导体丰富的磁光特性也为光学自旋功能器件的开发创造了新的条件。自旋基的光学隔离器就是其中的一种。光学隔离器的主要作用是阻止反射光束回到激光二极管，以免发生不稳定的振荡。K. Onodera 用稀磁半导体 $Cd_{0.70\sim0.75}Mn_{0.15\sim0.17}Hg_{0.12\sim0.13}$ 单晶棒作法拉第转子，和偏光玻璃、NdFeB 永磁体一起组成了新一代光通信系统光学隔离器，用于 980nm 掺铒光纤放大器（Erbium doped fiber amplifier，EDFA）中来保护激光二极管。这一稀磁半导体（Verdet constant $=0.02\pi$deg/A）的应用成功地替代了通常使用的石榴石（garnet）单晶，成为短波段商用光学隔离器的理想选择。在 $\lambda=980$nm 测得正向损耗 1.0dB，反向损耗 30dB，功率容量 100～200MW。

应用大规模集成和微组装技术，还可以将光纤用磁光隔离器与波分复用（WDM）滤波器、光耦合器一体化，可以实现 EDFA 的小型化。当宽带网络的用户终端在 Gb/s 时，上述集成技术即可发挥所长。Ⅲ-Ⅴ族化合物的磁性半导体（Ga，Mn）As，（In，Mn）As 等可以与 GaAs 和 InP 集成在一起，在带边附近有与Ⅱ-Ⅵ隔离器相同量级的 Verdet 常数，是优秀的集成光隔离器备选材料。

第 5 章　其 他 磁 性 材 料

1　微波铁氧体材料与器件

微波铁氧体器件是利用铁氧体材料的旋磁性或铁磁共振效应制成的微波器件。自 20 世纪 50 年代初 C. L. Hogan 研制出回相器、隔离器和环行器以来，这类器件获得了迅速发展，目前已达上千种。这类器件的适用频率范围、结构形式及其用途很不相同，通常可分为两类：线性器件和非线性器件。线性器件是指在微波功率较小的条件下（$h \ll H_0$，h 为微波磁场，H_0 为外加恒定磁场）只考虑微波磁场 h 和微波磁感应强度分量 b 线性项的器件。这类器件只影响微波的传输和衰减，不会造成频率的变化。相移器、环行器、隔离器、滤波器等都属于这类器件。在线性器件中，按它们所应用的恒定磁场大小又可分为低场器件（所加的恒定磁场低于共振磁场）、高场器件（所加的恒定磁场高于共振磁场）和共振式器件（所加的恒定磁场为共振磁场）三种。一般地说，当微波信号的频率较低时（在 1000MHz 以下）多采用高场方式；当微波信号的频率较高时（在 1000MHz 以上）多采用低场方式。不论低场器件、高场器件或共振式器件，按其功能又分为互易性器件和非互易性器件。对于互易性器件，当电磁波沿正反两个方向传输时具有相同的效能，如衰减器、调制器和滤波器等；对于非互易性器件，当电磁波沿正反两个方向传输时具有不同的效能，如隔离器、环行器和非互易相移器等。需要指出的是，自 1952 年发明了微波铁氧体器件以后，微波线路中才开始有了非互易性器件，这对当时雷达技术的发展起了重要作用。所谓非线性器件是指在微波功率较大的情况下不仅要考虑 h 和 b 的线性项还要考虑其高次方项的器件。这时将发生频率的变化，即倍频效应。混频器、倍频器、检波器和限幅器等都属于这类器件。

多年来，关于微波铁氧体材料和器件的研究已经成为磁学领域和微波技术领域研究的一个重要内容，而包括隔离器、环行器、相移器和电调滤波器在内的多种微波铁氧体器件，已经成为微波技术中的常用器件。

1.1　微波铁氧体的非互易效应

在微波铁氧体线性器件中有这样一类器件，当电磁波沿正反两个方向通过它时将产生完全不同的效能。例如，当将一个隔离器置于微波线路中时，对于正向传输的电磁波它只产生很小的能量损耗，而对于反向传输的电磁波它将吸收掉绝大部分能量。因此，装有隔离器的微波线路实际上是一个单方向的微波线路。这样的铁氧体器件还很多。凡是由磁化的铁氧体材料产生的、对沿正反两个方向上传输的电磁波具有不同作用的，我们称之为微波铁氧体的非互易效应。

微波铁氧体的非互易效应来自铁氧体介质的旋磁性以及与旋磁性有关的铁磁共振效应和场移效应，下面分别加以介绍。

1.1.1　旋磁性

当铁磁介质受到一恒定外磁场作用时，外磁场所感生的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 与外磁场 $\boldsymbol{H}$ 间的关系为

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H} \tag{2.5-1}$$

式中：μ 为磁化率，标量。

当铁磁介质同时受到一恒定磁场与高频交变磁场作用，其中恒定磁场的大小又远大于高频交变磁场的幅值时，与高频交变场相对应的磁导率则为一张量。具体地说，如设恒定磁场 $\boldsymbol{H}$ 沿 Z 轴方向，以 H_Z 表示；高频交变场 $\boldsymbol{h} = \boldsymbol{h}_0 e^{j}$ 沿空间任一方向，它在坐标轴上的 3 个分量分别以 h_x，h_y，h_z 表示，且 $|\boldsymbol{H}| \gg |\boldsymbol{h}_0|$。在这种情况下，高频交变磁场所对应的磁导率为一反对称形式的张量。为了说明这一问题，我们解如下磁矩运动方程：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{M}}{\mathrm{d}t} = -\gamma \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}} \tag{2.5-2}$$

式中：$\gamma = \mu_0 |e| g/2\mathrm{m}$ 为旋磁比；μ_0 为真空磁导率；e 为电子的电量；g 为朗德因子，对于电子自旋磁矩，$g=2$，于是有 $\gamma = 2.211 \times 10^5 (\mathrm{A/m})^{-1}\mathrm{S}^{-1}$；$\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}$ 为有效场，在这里为恒定磁场和高频交变磁场之和，即 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}} = \boldsymbol{H} + h$；$\boldsymbol{M}$ 为 $\boldsymbol{H}$ 与 $\boldsymbol{h}$ 产生的磁化强度之和，如设 $\boldsymbol{H}$ 沿 Z 轴方向，$\boldsymbol{h}$ 沿任意方向，则有 $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{i}m_x + \mathrm{j}my + \boldsymbol{k}(M + m_y)$。$M$ 为恒定磁场 H_Z 产生的磁化强度。

根据假设条件，$|\boldsymbol{H}| \gg |\boldsymbol{h}_0|$，因而有 $M \gg |\boldsymbol{m}|$；把 $\boldsymbol{h}$ 和 $\boldsymbol{m}$ 作为小量，取其线性解并注意到 $\boldsymbol{b} = \mu_0(\boldsymbol{h} + \boldsymbol{m})$，可得：

$$\left.\begin{aligned} b_x &= \mu_0(\mu h_x - \mathrm{i}k h_y) \\ b_y &= \mu_0(\mathrm{i}k h_x + \mu h_y) \\ b_z &= \mu_0 h_z \end{aligned}\right\} \tag{2.5-3}$$

不难看出，这时磁导率 μ_{ij} 为一张量，其形式为：

$$\mu_{ij} = \begin{bmatrix} \mu & -\mathrm{i}k & 0 \\ +\mathrm{i}k & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.5-4}$$

张量磁导率 μ_{ij} 的物理意义在于：b_x 不仅与 h_x 有关，而且与 h_y 有关；k 前的“−i”表示，h_y 所引起的 b_x 的变化在位相上比 h_y 落后 $\pi/2$。同样，b_y 不仅与 h_y 有关，而且与 h_x 有关；k 前的“+i”表示，h_x 所引起的 b_y 的变化在位相上比 h_x 超前 $\pi/2$。为什么会发生这种现象呢？这是因为，当考虑到磁化的动态过程时，铁磁介质的磁矩 $\boldsymbol{M}$ 在受到外加恒定磁场 $\boldsymbol{H}$ 作用后将绕 $\boldsymbol{H}$ 做右旋进动（称为拉莫尔进动），进动频率 $\omega_0 = \gamma H$，式中 γ 为旋磁比。在 $\boldsymbol{M}$ 绕 $\boldsymbol{H}$ 进动的过程中，如果再受到高频交变磁场 $\boldsymbol{h}$ 的作用，h_x 就不仅引起 x 方向磁感应强度的变化，还必然引起 y 方向磁感应强度的变化；同样，h_y 不仅引起 y 方向磁感应强度的变化，也必然引起 x 方向磁感应强度的变化。这就是张量磁导率的物理成因。考虑到 $\boldsymbol{M}$ 在绕 $\boldsymbol{H}$ 进动的过程中经过 x 轴和 y 轴的次序不同，故表示磁导率的张量元存在着位相上的差别。

人们通常把铁磁介质的磁导率为张量的特性称为旋磁性。由于这一张量具有反对称的形式，因而利用它可以制造多种非互易器件。

1.1.2　铁磁共振

上面介绍旋磁性时没有考虑磁矩 $\boldsymbol{M}$ 在绕恒定磁场 $\boldsymbol{H}$ 进

动过程中所受到的阻尼，而实际上这种阻尼总是存在的。考虑到阻尼作用后，张量磁导率的张量元 μ 和 k 就不再是单纯的实数，而变为复数。其实部和普通的磁导率有相同的意义，称弹性磁导率；虚部代表能量损耗，称黏滞性磁导率。在恒定磁场 $\boldsymbol{H}$ 的大小一定的条件下，能量损耗的大小随交变磁场的频率而变化。在某一频率下，能量损耗出现极大值，我们称之为铁磁共振。为了具体地说明这个问题，我们解带有阻尼项的磁矩运动方程：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{M}}{\mathrm{d}t} = -\gamma \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H} + \boldsymbol{T}_{\mathrm{D}} \tag{2.5-5}$$

式中：$\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 为阻尼力矩。

对铁磁共振，通常将 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}}$ 取为朗道一票弗席兹形式：

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{D}} = -\frac{\lambda}{M^2}[\boldsymbol{M} \times (\boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H})] \tag{2.5-6}$$

式中：λ 为阻尼系数。

设 $\boldsymbol{H} \equiv (h_x, h_y, h_z)$，$H_Z$ 为恒定磁场，$\boldsymbol{h}(h_x, h_y, h_z) = \boldsymbol{h}_0 \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}$ 为交变磁场，且 $H_Z \gg |\boldsymbol{h}_0|$。在将 $\boldsymbol{h}$ 及由此产生的 $\boldsymbol{m}$ 取为小量的情况下，只保留 m 和 h 的一次项，解上述方程可得：

$$\begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu & -\mathrm{i}k0 & 0 \\ +\mathrm{i}k & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} \tag{2.5-7}$$

式中：$\mu = \mu' - \mathrm{i}\mu''$，$k = k' - \mathrm{i}k''$ 均为复数，其实部和虚部的表达式为：

$$\left.\begin{aligned} \mu' &= 1 + \frac{1}{D}\left[M\gamma^2 H_0 (\gamma^2 H_0^2 - \omega^2) + 2\omega^2 \frac{\lambda^2}{x_0}\right] \\ k' &= -\frac{1}{D}\gamma M\omega (\gamma^2 H_0^2 - \omega^2) \\ \mu'' &= \frac{1}{D}\lambda\omega (\gamma^2 H_0^2 + \omega^2) \\ k'' &= \frac{2}{D}\lambda\omega^2 \gamma H_Z \end{aligned}\right\} \tag{2.5-8}$$

其中

$$D = \gamma^2 H_0^2 - \omega^2 + 4\omega^2 \frac{\lambda^2}{x_0^2} \tag{2.5-9}$$

式中：$x_0 = M/H_Z$，为静态磁化率；$H_0 = H_Z (1 + \lambda^2/\gamma^2 M^2)^{\frac{1}{2}} \approx H_Z$。

考察 μ'' 和 K'' 可以发现，当 $\omega = \gamma H_0 \approx \gamma H_Z$ 时，μ''、K'' 出现极大值，此即铁磁共振。为什么当 $\omega = \gamma H_0 \approx \gamma H_Z$ 时会发生铁磁共振呢？为了说明这一问题，需要研究交变磁场的不同模式对计算结果的影响。在上面的讨论中我们没有对交变磁场的形式做任何限定，即认为交变磁场可为任意形式。为了说明铁磁共振的起因，我们设定交变磁场分别为正圆偏振场和负圆偏振场。所谓正（负）圆偏振场是指以恒定磁场的方向为基准按右（左）手转动规则旋转的磁场。即，如设恒定磁场 $\boldsymbol{H}$ 沿 Z 轴方向，对正圆偏振场来说，h_x 应比 h_y 在位相上超前 $\pi/2$。因而可将正负圆偏振场分别表示为：

$\boldsymbol{h}_+ = (h_0 \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} - \mathrm{i}h_0 \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t})$，正圆偏振场。

$\boldsymbol{h}_- = (h_0 \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} + \mathrm{i}h_0 \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t})$，负圆偏振场。

计算表明，正（负）圆偏振场所产生的磁感应强度也具有正（负）圆偏振的形式，其对应关系为：

$$\begin{bmatrix} b_+ \\ b_- \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu - k & 0 & 0 \\ 0 & \mu + k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_+ \\ h_- \\ h_z \end{bmatrix} \tag{2.5-10}$$

如令

$$\mu_+ k = \mu'_{\pm} - \mathrm{i}\mu''_{\pm} \tag{2.5-11}$$

可得：

$$\left.\begin{aligned} \mu'_{\pm} &= 1 + \frac{1}{D}\left[\gamma M (\gamma^2 H_Z^2 - \omega^2)(\gamma H_Z \pm \omega) + 2\omega^2 \frac{\lambda^2}{x_0}\right] \\ \mu''_{\pm} &= \frac{1}{D}\lambda\omega (\gamma H_Z \pm \omega)^2 \end{aligned}\right\} \tag{2.5-12}$$

其中

$$D = (\gamma^2 H_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \frac{\lambda^2}{x_0^2} \tag{2.5-13}$$

分析式（2.5-12）和式（2.5-13），可以得到如下结论：

（1）当垂直于恒定磁场的交变磁场为正圆偏振场或负圆偏振场时，磁导率不再为张量而变为标量。这说明正圆偏振场和负圆偏振场是两个本征运动模式，用它们作为本征矢量的话，便不存在项间互相耦合。

（2）对于正圆偏振场，当 $\omega \approx \gamma H_Z$ 时，μ'' 出现极大值，说明能量损耗最大，产生了铁磁共振；对于负圆偏振场，无论 ω 如何变化，μ'' 都不会出现极大值，说明不会出现铁磁共振。

（3）任意形式的高频交变磁场，其垂直于恒定磁场的分量都可能分解为正圆偏振场与负圆偏振场之和。既然正圆偏振场部分会发生铁磁共振，因此从整体上看也会发生铁磁共振现象。

正圆偏振场会产生铁磁共振而负圆偏振场不会产生铁磁共振现象是因为正圆偏振场的旋转方向与 $\boldsymbol{M}$ 绕 H_Z 的进动方向一致，两者属于同一运动模式，当交变磁场的频率 ω 与 $\boldsymbol{M}$ 的进动频率 ω_0 相同时，便发生了铁磁共振；而负圆偏振场的旋转方向与 $\boldsymbol{M}$ 绕 $\boldsymbol{H}$ 的进动方向相反，两者属于不同的运动模式，因而不可能发生共振现象。

发生铁磁共振时，绕 H_Z 进动的 $\boldsymbol{M}$ 源源不断地从正圆偏振场吸收能量以克服它所受到的阻尼力矩，能量损耗达到极大值。损耗能量的大小与阻尼系数 λ 有关，但 λ 并不是一个可以直接测量的量，通常用共振线宽 ΔH 来表征阻尼系数的大小。ΔH 的定义是：μ 一定时，在 $\mu''_+ \sim H_Z$ 曲线的共振峰两边，μ''_+ 降低到峰值一半处所对应的两个 H_Z 值之差（见图 2.5-1）。容易证明

$$\Delta H = 2\lambda/\gamma x_0 \tag{2.5-14}$$

铁氧体单晶材料的 ΔH 一般较小，多数约为 10^3 A/m，$Y_3Fe_5O_{12}$ 单晶体的 ΔH 最小可达到 8A/m。铁氧体多晶材料的 ΔH 通常较大，例如 $Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4$ 多晶体的 ΔH 多数在 10^4 A/m。

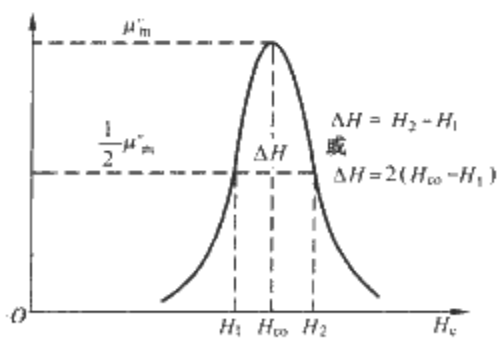


图 2.5-1 铁磁共振线宽 ΔH 的定义图

1.1.3 场移效应

为了说明场移效应，先介绍微波信号（或称超高频电磁波）沿矩形波导管传输时的波型。矩形波导管是用良导体材

料（如铜、铝合金等）制成的矩形空管，要求其内壁具有很高的光洁度。微波信号沿着波导管传输时，必须满足麦克斯韦方程和波导的边界条件。因此，只允许信号以某些方式传输。在图 2.5-2 所示的矩形波导中，能够传输的电磁波分为两类：一类叫横电波，以 TE 表示。它的电场只分布在波导管的横截面上。也就是说，沿波导管传输方向只有磁场分量，没有电场分量，因此也叫磁波，以 H 表示。另一类叫横磁波，以 TM 表示。它的磁场只分布在波导管的横截面上。在波导管的传输方向，只有电场分量没有磁场分量，因此又叫电波，以 E 表示。与场移效应有关的是 TE 型波。

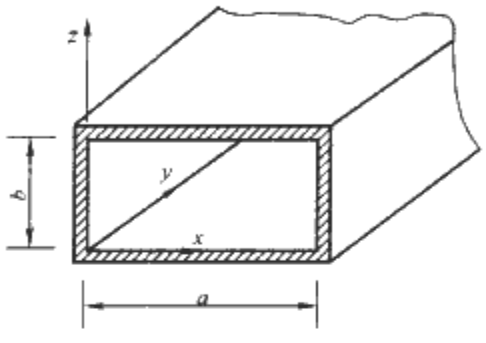


图 2.5-2　矩形波导管

根据图 2.5-2 所示的波导结构，计算所得的 TE 型波的电磁场分量为：

$$\left.\begin{aligned} E_x &= \omega\frac{n\pi}{b}\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}z\right)e^{i(\omega t+\beta y)} \\ E_z &= i\omega\frac{m\pi}{a}\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}z\right)e^{i(\omega t+\beta y)} \\ E_y &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{2.5-15}$$

$$\left.\begin{aligned} h_x &= \frac{\beta}{\mu}\frac{m\pi}{a}\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}z\right)e^{i(\omega t+\beta y)} \\ h_y &= i\frac{\pi^2}{\mu}\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}z\right)e^{i(\omega t+\beta y)} \\ h_z &= \frac{\beta}{\mu}\frac{n\pi}{b}\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}z\right)e^{i(\omega t+\beta y)} \end{aligned}\right\} \tag{2.5-16}$$

式中：μ 为矩形波导内介质的磁导率；β 为波的位相常数；m 和 n 为 0，1，2，…等正整数，一组 m，n 对应于一个 TE 型波，记为 TE_{mn}。原则上一个矩形波导可以传输无数个 TE 型波，而实际上通常仅利用 TE_{10} 型波。为了消除其他型波，下面介绍临界波长概念。在矩形波导中传输 TE_{mn} 型波时存在着临界波长 λ_c，λ_c 的大小由下式确定：

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}}} \tag{2.5-17}$$

TE_{mn} 型波在波导中可以传输的条件是微波信号的波长 λ 小于它的临界波长 λ_c。m 和 n 的数值不同，对应的临界波长也不同。在所有的 TE_{mn} 型波中，以 TE_{10} 的临界波长最大，故当所选择的信号波长小于 TE_{10} 型波的临界波长而大于其他 TE_{mn} 型波的临界波长时，波导中便只有 TE_{10} 型波可以传输。例如，信号波长为 10cm，取 $a=7$cm，$b=3$cm，便只有 TE_{10} 型波可以传输。

由式（2.5-15）可知，TE_{10} 型波的电磁场为：

$$\left.\begin{aligned} E_z &= \omega\frac{\pi}{a}\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{i(\omega t+\beta y)} \\ h_x &= \frac{\beta}{\mu}\frac{\pi}{a}\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{i(\omega t+\beta y)} \\ h_y &= i\frac{\pi^2}{\mu a^2}\cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{i(\omega t+\beta y)} \end{aligned}\right\} \tag{2.5-18}$$

其余的电磁场分量为零。在矩形波导管的一侧放置一块矩形的铁氧体介质并沿 Z 轴方向加恒定磁场 H_z，如图 2.5-3（a）所示。由于铁氧体介质的旋磁性，TE_{10} 波的电场分布将发生变化，并且这种变化与微波信号在波导管内的传输方向有关。当微波信号沿 $+Y$ 方向传输时，电场 E_z 在铁氧体介质内有被移开的趋势；当微波信号沿 $-Y$ 方向传输时，电场 E_z 在铁氧体介质内有被集中的趋势。两者的电场分布均与空波导时有明显的差别，如图 2.5-3（b）所示。这种因铁氧体被磁化而产生的，随信号传输方向而不同的电场分布的变化，通常称为场移效应。

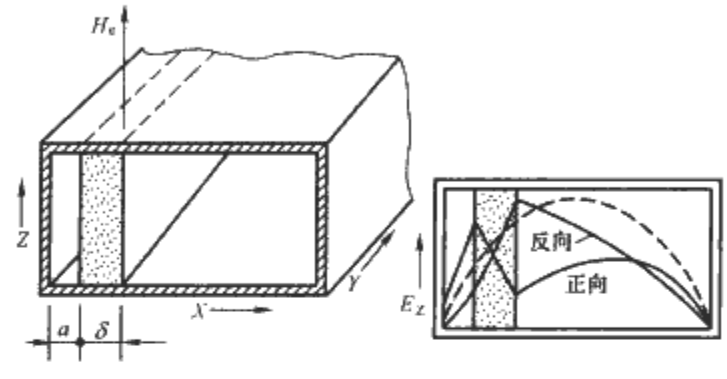


图 2.5-3　填充铁氧体片的波导及其电场强度的分布
（a）填充铁氧体片的波导；（b）电场强度的分布

通过改变铁氧体材料的性能、恒定磁场的大小以及铁氧体的几何尺寸和安装位置，可对场移效应进行有效地控制。利用这一效应已经制备出多种微波铁氧体器件，如场移式隔离器、非互易相移器等。

1.2　微波铁氧体材料

在微波铁氧体器件中用作磁性介质的铁氧体材料称为微波铁氧体材料。由于微波铁氧体器件有许多种类，它们的功能、结构、工作频率以及在制作时所依据的基本原理不同，因而对微波铁氧体材料的要求也不完全一致。一般从以下几方面性能加以考虑：

（1）对饱和磁化强度 M_s 的要求。根据旋磁性理论，材料的 M_s 与旋磁性密切相关。M_s 越高，旋磁性越强，因而越有利于缩小器件的体积。另外，从器件的制作调试来看，材料的 M_s 越高，越容易使器件调配。从以上两者出发，要求材料具有较高的 M_s。但是，M_s 增大，会使零场损耗上升。因此，从降低能量损耗出发，M_s 又不能太大。通常要求材料的 M_s 与工作频率 ω 之间满足如下关系：

$$\gamma M_s/\mu \approx 0.6 \tag{2.5-19}$$

从器件的使用功率来看，发生非线性效应（或称高功率现象）的临界场 h_{crit} 也与 M_s 的大小有关。M_s 越大，h_{crit} 越低。对于线性器件，为了使 h_{crit} 尽量地高，则要求材料的 M_s 要小一些；对于非线性器件，为了使 h_{crit} 尽量地低，则要求材料的 M_s 要大一些。

综上所述，应根据器件的工作方式和工作频率合理地选择材料的 M_s。

（2）对铁磁共振线宽 ΔH 的要求。铁磁共振线宽 ΔH 是微波铁氧体材料的主要参数之一。对于低场器件，其恒定磁场工作在零场吸收峰与铁磁共振吸收峰之间的低损耗区，ΔH 太大会使这一低损耗区域变窄，因而使器件的应用频率范围变窄。特别是对于工作频率较低的微波铁氧体器件（工作频率在 2000MHz 以下），其铁磁共振峰所对应的恒定磁场已经较低，只有 ΔH 很小才能保证有一个可供应用的低损

耗区域，从而使器件具有足够的工作频率宽度。

对于共振式器件，例如共振式隔离器，共优值 R（共振式隔离器的优值 R 指反向与正向能量损耗之比）和隔离度均与 ΔH 有关。ΔH 越小，优值越高，隔离度也越大。从这一角度讲，应要求材料具有小的 ΔH。但 ΔH 小，对应的工作频率范围也将随之变窄。为了使器件具有较宽的使用频率范围，应保持 ΔH 有足够的宽度。

此外，产生非线性效应的临界场 h_{crit} 与 ΔH 成正比。为了保证器件的低损耗性能，人们不采用增大 ΔH 以提高 h_{crit} 的方法。

总之，对 ΔH 的要求是多方面的。通常通过控制 ΔH 以达到器件所具有的性能。

(3) 对居里温度 T_C 的要求。微波铁氧体器件的工作温度一般在（−60～+100℃）之间。对于高功率器件，由于本身消耗功率大而可能使工作温度高达 100℃以上。在这样宽的温度范围内要求器件能够保持良好的性能，需要材料的 M_s 具有很好的温度稳定性。对于尖晶石型的铁氧体而言，M_s 随温度上升而下降，因而提高居里温度 T_C 成为改善 M_s 温度稳定性的有效措施之一。而居里温度高的材料通常具有高的 M_s，高 M_s 不一定能满足微波铁氧体器在设计上的要求。在这种情况下，可以采用 M_s 温度稳定性较好的石榴石型的铁氧体材料。

(4) 对电阻率 ρ 和介电损耗 $\tan\delta$ 的要求。由于微波铁氧体材料用于微波波段，为了减少能量损耗，要求材料必须有足够高的电阻率 ρ 和足够小的介电损耗。通常 ρ 应大于 $10^6\,\Omega\cdot m$，$\tan\delta$ 应小于 10^{-3}。

(5) 对介电常数 ε 和抗电性能的要求。介电常数是影响电磁波在介质中传播的重要参数之一。铁氧体材料的介电常数 ε 在微波波段变化不大。尖晶石型铁氧体的介电常数 ε 约为 12，石榴石型铁氧体的介电常数约为 15。

抗电性能表征介质在电磁场中耐电击穿的能力。对于高功率铁氧体器件，这一特性显得特别重要。

满足以上各项要求的铁氧体材料按其晶体结构分为 3 类：尖晶石型、石榴石型和磁铅石型。其中广泛应用的是尖晶石型、石榴石型。

1.2.1 石榴石型材料

这类铁氧体材料在微波器件中应用较晚（约从 20 世纪 50 年代后期到 60 年初期开始应用）。但由于它具有许多优越的性能：共振线宽窄，介电损耗低，电阻率高，饱和磁化强度可以在较宽的范围内变化并且温度稳定性好，因而不论作为多晶材料还是单晶材料都获得了广泛应用。

石榴石型铁氧体与天然石型石晶体 $(Fe,Mn)_3Al_2(SiO_4)_3$ 有相同的晶体结构，属体心立方，空间群为 O_h^{10} (Ia3d)。研究最多的是钇铁石型石铁氧体（$Y_3Fe_5O_{12}$，简写为 YIG），其他各种石榴石铁氧体都是在 YIG 的基础上发展起来的。

(1) 钇铁石榴石材料。在这种材料的晶体中，每个晶胞由 8 个 $Y_3Fe_5O_{12}$ 组成，其中 O 离子构成体心立方晶体，金属离子占据 O 离子晶体的间隙位置：Fe 离子分别占据 24 个四面体间隙（24d）和 16 个八面体间隙（16a）；Y^{3+} 或其他三价稀土元素离子则占据 24 个十二面体的间隙（24c）。24d 位 Fe 离子的磁矩与 16a 位 Fe 离子的磁矩方向相反，两者合成后每个分子的合成磁矩为 $5\mu_B$（其中 μ_B 为玻尔磁子）；24c 位金属离子的磁矩又与上述磁矩反平行。因而钇铁石榴石的分子磁矩为

$$m = |3M_C - 5\mu_B| \qquad (2.5\text{-}20)$$

对于 YIG，因 Y^{3+} 无磁矩，故 $m=5\mu_B$。YIG 多晶材料的饱和磁化强度 M_s 随温度的变化如图 2.5-4 所示。室温下的 M_s 为（1680～1775）$\times10^{-4}$T，居里温度 T_c 为 559K，晶格常数 a 为 12.36×10^{-10}m。

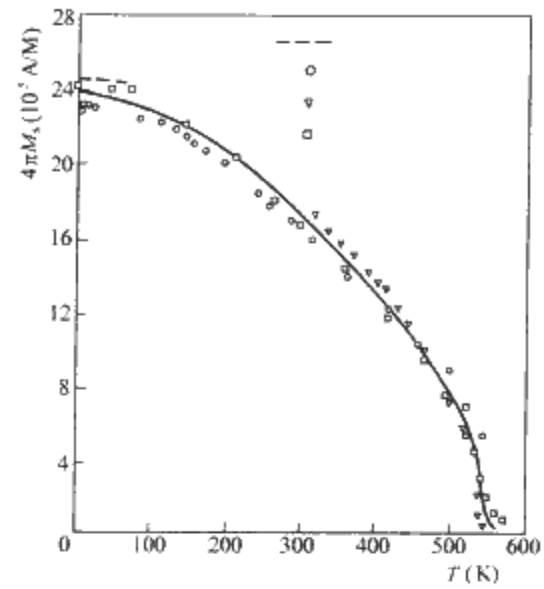


图 2.5-4 YIG 的饱和磁化强度随温度的变化

在 YIG 中，所有的金属离子都处于三价状态，所以电阻率比较高，可达 $10^8\,\Omega\cdot m$ 以上。需要指出的是，YIG 的电阻率与烧结温度、所含杂质有密切关系。通过掺入少量 Cu^{2+} 和 V^{5+} 可使最佳烧结温度降到 1300℃以下，这时电阻率可达到 $10^{10}\,\Omega\cdot m$。如果烧结温度超过 1300℃，电阻率将下降几个数量级。当配方中 Fe_2O_3 的含量超过其化学正分值时，由于含有过多的 Fe 离子，即使在较低的温度下烧结，电阻率也很低。

多晶 YIG 的共振线宽 ΔH 与空隙度密切相关。随材料密度增加，ΔH 近于线性减少，即使在相对密度达到 99%时依然如此。此外，多晶 YIG 的共振线宽 ΔH 还随温度下降而增加。低温时 ΔH 的增加尤为明显，为制造低温器件带来了困难。

多晶 YIG 材料发生非线性效应的临界场 h_{crit} 与材料的平均粒度有关。实验表明，细颗粒材料能够有较高的微波效率。

(2) 钇铝铁石榴石材料。为了降低 YIG 的 M_s 以适应低频段微波器件的要求，最常用的方法是用 Al^{3+} 代换 YIG 中部分 Fe^{3+}，从而形成了钇铝铁石榴石（简写为 YAlIG）。Al^{3+} 在石榴石晶格中倾向于占据四面体间隙，因而随 Al^{3+} 浓度的增加，M_s 逐渐降低，并且居里温度也随之下降。

图 2.5-5 表示出了三种不同成分的 YAlIG 的 M_s 随温度的变化，并与 YIG 的情况进行了比较。由图可见，Al^{3+} 对 Fe^{3+} 的取代在一定程度上提高 M_s 的温度稳定性。

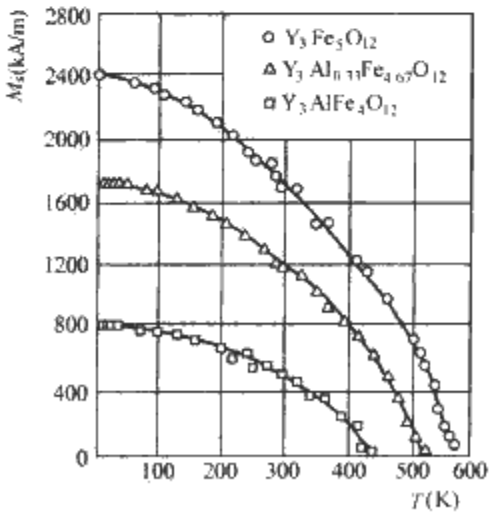


图 2.5-5 YAlIG 的饱和磁化强度随温度的变化

与 YIG 一样，YAlIG 的共振线宽 ΔH 随温度下降而增加，此外还随 Al^{3+} 的增多所造成的 M_s 下降必然减弱了退磁场，因而 ΔH 随之减小。

YAlIG 的电阻率很高，介电损耗也很小，介电常数为 15。但当 Fe 的含量大于正分值时，介电损耗将急剧上升；当 Fe 的含量低于正分值时，介电常数则迅速下降。表 2.5-1 列出了可用于 600～4000MHz 频率范围的 YAlIG 材料的磁性能。由表可见，YAlIG 材料是 C 波段以下频率范围内的一种很好的微波铁氧体材料。

表 2.5-1　　不同成分 YAlIG 材料的磁性能

$Y_3Al_xFe_{5-x}O_{12}$ $x=$	M_s $\left(\frac{10^3}{4\pi}\text{A/m}\right)$	ΔH $\left(\frac{10^3}{4\pi}\text{A/m}\right)$	T_c (℃)	ε	$\tan\delta$
1.35	133	40	136	14.25	2×10^{-4}
1.25	200	40	140	14.35	2×10^{-4}
1.00	400	50	150	15.10	1×10^{-4}
0.75	670	39	170	14.20	1×10^{-4}
0.50	100.5	44	200	15.50	1×10^{-4}

（3）钇钆铁石榴石材料。钇钆铁石榴石（简写为 YGdIG）由钇铁石榴石和钆铁石榴石（GdIG）按不同比例复合而成。GdIG 与 YIG 有相似的磁结构，其分子磁矩是：

$$m = |M_{Fe} - 3M_{Gd}| \qquad (2.5\text{-}21)$$

Gd^{3+} 的磁矩为 $7\mu_B$，因而 GdIG 的分子磁矩为 $16\mu_B$，其方向与 24C 位 Gd^{3+} 的磁矩相同。以上计算是 T→0K 的情况。随着温度的上升，24C 位的磁矩比 24d 位、16a 位的磁矩下降得快，因而在某一温度下两者的磁矩将相等而互相抵消，称为“抵消点现象”。存在着“抵消点”是 GdIG 的一个重要特点。GdIG 的居里温度为 562°K，抵消点温度为 290°K，室温下的 M_s 为 7.17×10^3 A/m。在抵消点附近，共振线宽 ΔH 达 199×10^3 A/m，因此单纯的 GdIG 材料并无太大的使用价值。

将 YIG 和 GdIG 按不同的比例复合成 YGdIG，可使饱和磁化强度 M_s 在较大的范围内变化，并且在抵消点与居里点之间获得 M_s 随温度变化的平坦区域（见图 2.5-6），以改进 M_s 的温度稳定性。

由图 2.5-6 可以看出，当 $x=1.8$ 时，M_s 在 -40～150℃的温度范围内变化不大，因而有良好的温度稳定性。这一成分的其他参数为：ΔH 约为 15.9×10^3 A/m（室温，在 x 波段测量），$g_{有效}=2.08$，$\varepsilon=13$，$\tan\delta$ 约为 0.004。

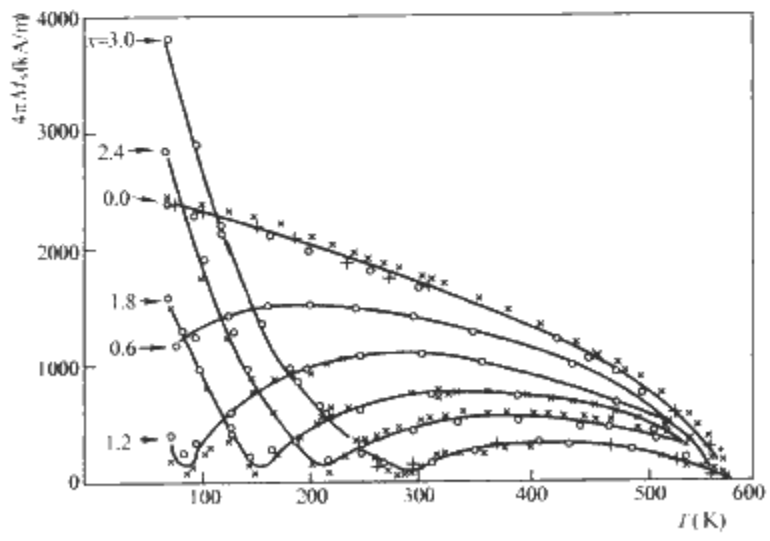


图 2.5-6　$Y_{3-x}Gd_xFe_5O_{12}$ 的 $4\pi M_s$ 对 T 关系曲线

（4）钇钆铝铁石榴石材料。为了获得饱和磁化强度 M_s 更低且温度稳定性良好的材料，可以在 YGdIG 中用 Al^{3+} 取代部分 Fe^{3+} 以形成钇钆铝铁石榴石（YGdAlIG）。$Y_{1.5}Gd_{1.5}Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ 的饱和磁化强度 M_s 随含铝量及温度的变化示于图 2.5-7 中。由图可见，随含铝量增加，M_s 下降，T_C 也下降，抵消点向正温移动。当 x 在 0 和 1.0 之间时，可获得一组室温下 M_s 低于 71.7×10^3 A/m、且温度稳定性良好的材料。这组材料的其他参数为：ΔH（室温，x 波段）约为（13.1～23.9）$\times10^3$ A/m；$g_{有效}$（室温，x 波段）为 2.04～2.10；$\tan\delta$（1000MHz）约为 4×10^{-3}。

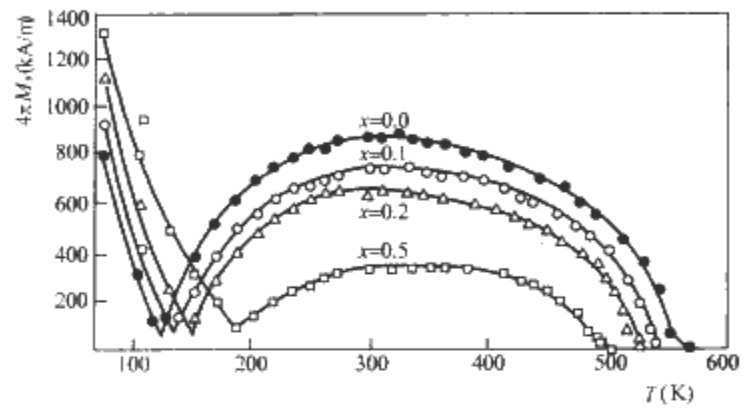


图 2.5-7　置换铝的复合 $Y_{1.5}Gd_{1.5}Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ 的 $4\pi M_s$ 随成分和温度的变化

（5）钇钆镝铁石榴石材料。绝大多数稀土离子具有较强的自旋与晶格的耦合作用。通过这种作用，电子自旋的非一致进动转化为晶格的振动，从而提高了材料承受功率的能力。但是 Gd^{3+} 是个例外，由于 Gd^{3+} 的轨道角动量等于零，它所具有的自旋与晶格的耦合作用甚小。为了提高 YGdIG 材料承受功率的能力，通常掺入少量的 Dy^{3+}，这就形成了钇钆镝铁石榴石（YGdDyIG）。成分为 $Y_{2.7-x}Gd_xDy_{0.3}Fe_5O_{12}$ 的 YGdDyIG 材料的饱和磁化强度 M_s 随含 Gd^{3+} 量和温度的变化见图 2.5-8。由图可见，当 x 取值在 0.9～1.5 之间时，可获得很好的 M_s 的温度稳定性。这组材料的其他性能参数量：

ΔH（室温，x 波段）：$(35.8\sim63.7)\times10^3$ A/m

$G_{有效}$（室温，x 波段）：2.00～1.80

$\tan\delta$（1000MHz）：4×10^3。

可以用它制造温度稳定性良好的高功率器件。

（6）钇钙钒铁石榴石材料。以上介绍的以 YIG 为基的各种石榴石是性能优良的微波铁氧体材料，得到了广泛应用。美中不足的是氧化钇的价格较贵。为此，人们又开始了少含

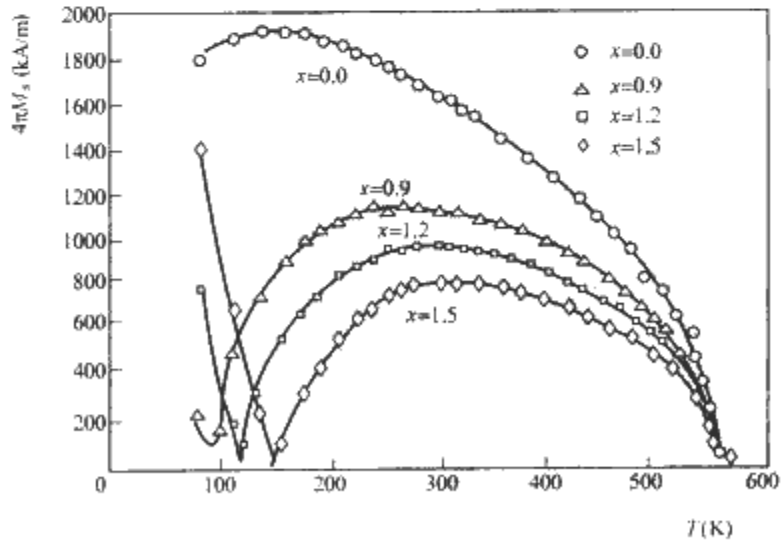


图 2.5-8　复合石榴石的 $Y_{2.7-x}Gd_xDy_{0.3}Fe_5O_{12}$ 饱和磁化强度随组成和温度的变化

钇或不含钇的石榴石材料，即钇钒铁石榴石和铋钙钒铁石榴石，下面分别介绍：

1）钇钙钒铁石榴石（YCaVIG）的分子式通常写为 $Y_{3-2x}Ca_{2x}Fe_{5-x}V_xO_{12}$。其中，$(Y_{3-2x}Ca_{2x})$ 占据 24c 位，Fe_2 占据 16a 位，$(Fe_{3-x}V_x)$ 占据 24d 位。这种材料的饱和磁化强度 M_s、有效 g 因子、共振线宽 ΔH 和居里温度 T_c 示于图 2.5-9 中。由图可见，材料的性能在很大程度上取决于 V 的含量：M_s 先是随 V 含量的增加而缓慢下降；当 V 的含量 $x=1$ 时，$M_s=0$；这时 g_{eff} 和 ΔH 出现了反常。当 x 从 1 增至 1.5 时，M_s 又线性上升。在 V 含量由零增至 1.5 的过程中，居里温度 T_c 一直在缓慢减小。与具有相同饱和磁化强度的 YAlIG 相比，YCaVIG 有更高的居里温度。这是含 V 石榴石材料的一个显著特点。此外，我们可用 In 取代 16a 位中的部分 Fe^{3+} 以降低 ΔH。具有最小 ΔH 的多晶体的成分是 $Y_{2.6}Ca_{0.4}Fe_{4.2}V_{0.2}In_{0.6}O_{12}$，其线宽 ΔH 能够低于 0.16×10^3 A/m。我们还可以将 GdIG 与 YCaVIG 相组合使之出现抵消点，以获得 M_s 随温度变化的平坦区域，从而提高 M_s 的温度稳定性。例如，成分为 $(Y_{0.5}Gd_{0.5})_{1.8}Ca_{1.2}Fe_{4.4}V_{0.6}O_{12}$ 的材料在 −124℃ 出现低点，在 −20～+120℃ 范围内 M_s 的变化仅为 $\pm1.99\times10^3$ A/m。

YCaVIG 材料的介电常数 ε 在 16 与 13 之间，介电损耗 $\tan\delta$ 小于 5×10^{-4}。

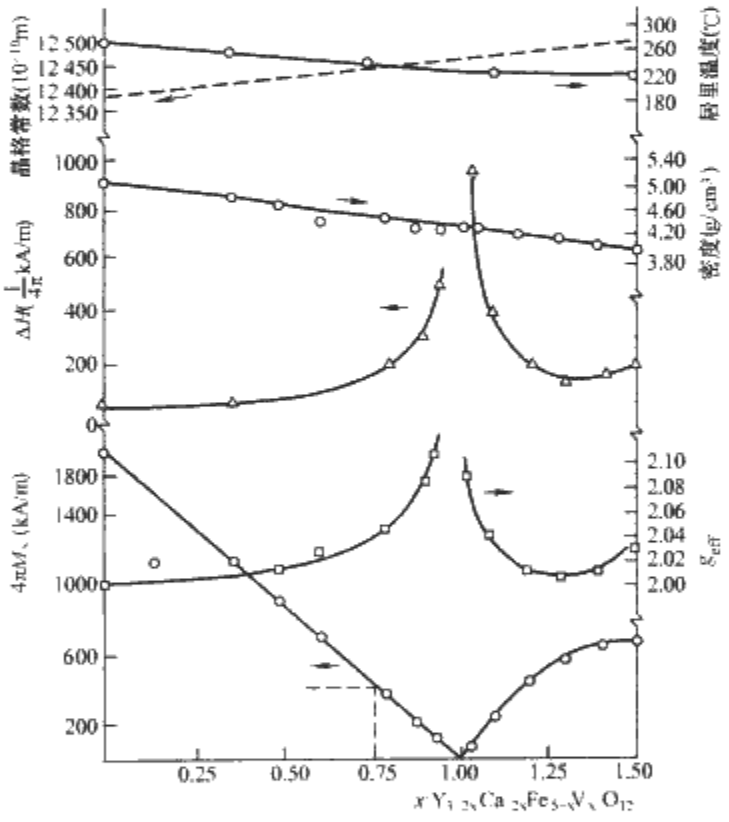


图 2.5-9 YCaVIG 的性能与其成分的关系

2）铋钙钒铁石榴石（BiCaVIG）的分子式可表示为 $Bi_{3-2y}Ca_{2y}Fe_{5-y}V_yO_{12}$。其中，$(Bi_{3-2y}Ca_{2y})$ 共同占据 24d 位，Fe_2 占据 16a 位，$(Fe_{3-y}V_y)$ 共同占据 24c 位。这类材料的 M_s、ΔH、ε、T_c 以及晶格常数等参数随成分的变化示于图 2.5-10。由图可见，当 $y<0.96$ 时，未能获得单相石榴石型材料。当 $y>0.96$ 时，M_s 随 V 含量的增加呈线性增加，ΔH 随 V 含量的增加而下降。在 $1.2<y<1.4$ 范围内，ΔH 的大小可与 YCaVIG 材料相比拟。居里温度 T_c 一直随 V 含量的增加缓慢下降。单相 BiCaVIG 材料的介电常数 ε 可高达 25 并且随 V 含量的增加而下降，介电损耗 $\tan\delta$ 可低于 5×10^{-4}。

为了提高 BiCaVIG 的温度稳定性，同样可以与 GdIG 组成复合石榴石，以获得 M_s 在随温度变化过程中的一个平坦区域。

图 2.5-11 给出了 YCaVIG、BiCaVIG 的 M_s 随温度变化的曲线，并与 YGdIG 和 YAlIG 进行了比较。由图可见，两种钙钒石榴石的温度稳定性虽不及 YGdIG，但优于 YAlIG，并且有较高的居里温度。可以说，YGdIG 和 YAlIG 是具有重要应用价值的低 M_s 微波铁氧体材料。

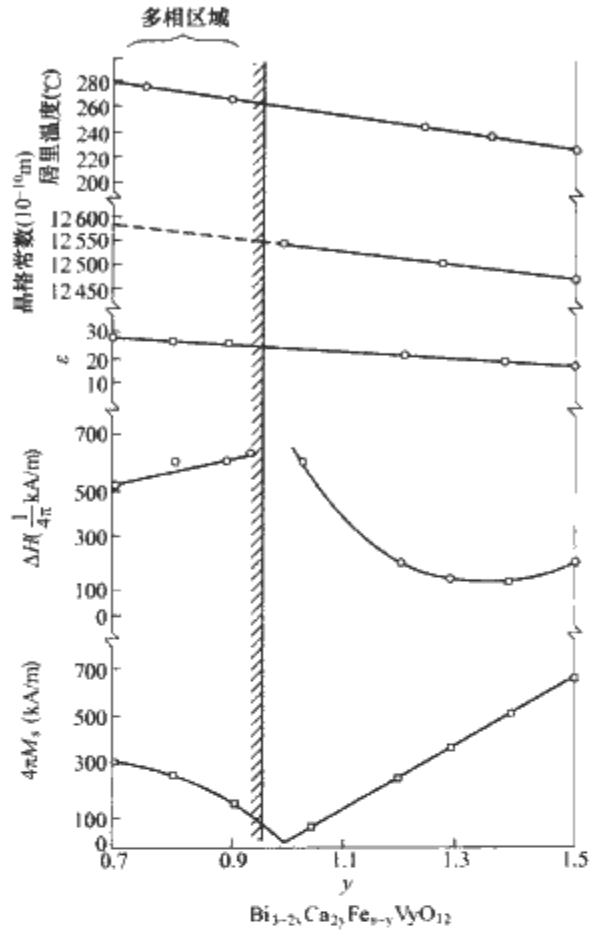


图 2.5-10 BiCaVIG 的性能与成分的关系

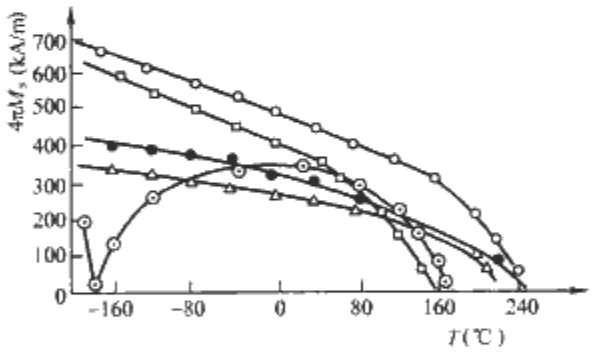


图 2.5-11 BiCaVIG 和 YCaVIG 的 $4\pi M_s$ 温度特性及与 YAlIG 和 YGdIG 情况的比较

○—$Y_{1.5}Ca_{1.5}Fe_{4.25}V_{0.75}O_{12}$；□—$3Y_2O_3\cdot5[80\%Fe_2O_3\cdot20\%Al_2O_3]$；●—$Bi_{0.5}Ca_{2.4}Fe_{3.8}V_{1.2}O_{12}$；⊙—$3[80\%Y_2O_3\cdot20\%Gd_2O_3]\cdot5[83\%Fe_2O_3\cdot17\%Al_2O_3]$；△—$Y_{0.75}Ca_{2.25}Fe_{3.875}V_{1.125}O_{12}$

1.2.2 尖晶石型材料

尖晶石型材料是在微波铁氧体器件最早应用的一类材料。由于这种类型的材料原料丰富、价格较低，一些重要的磁参数可以在较大范围内变动，以适应不同频段的要求，故仍为目前广泛应用的一类微波铁氧体材料。

尖晶石型铁氧体是指和尖晶石（$MgO\cdot Al_2O_3$）具有同样晶体结构的铁氧体，分子式通式为 $XO\cdot Fe_2O_3$（其中 X 代表二价金属离子）。晶体结构属于立方晶系，空间群为 O_h^7（F3dm）。每一个晶胞由 8 个分子组成，32 个 O^{-2} 离子组成面心立方晶格，24 个金属离子分别占据 O^{-2} 离子构成的 8 个四面体间隙（A 位）和 16 个八面体间隙（B 位）。金属离子优先占据 A 位的顺序是：Zn^{2+}，Ga^{2+}，In^{3+}，Mn^{2+}，Fe^{3+}，Mn^{3+}，Fe^{2+}，Mg^{2+}，Cu^{2+}，Co^{2+}，Ti^{4+}，Ni^{2+}，

Cr^{3+}。占据 A 位的金属离子磁矩与占据 B 位的金属离子磁矩方向相反。因此，每个分子的饱和磁矩是

$$m = |2m_B - m_A| \qquad (2.5\text{-}22)$$

式中：m_A、m_B 分别表示占据 A 位和 B 位的金属离子磁矩。

近年来常用的尖晶石型微波铁氧体材料有镁锰系、镍系和锂系，下面分别予以介绍。

(1) Mg—Mn 系尖晶石型铁氧体。Mg-Mn 系尖晶石型铁氧体是微波器件中应用最广泛的一种微波材料，它在各个微波频段都具有良好的技术性能。

镁锰系铁氧体由镁铁氧体（$MgFe_2O_4$）和锰铁氧体（$MnFe_2O_4$）按不同比例组合而成。下面分别对镁铁氧体和锰铁氧体的特性做一介绍：

1）镁铁氧体是一种混合型结构的尖晶石，其金属离子在两种晶位的分布为：

$$(Mg_x^{2+}\ Fe_{1-x}^{3+})[Mg_{1-x}^{2+}Fe_{1+x}^{3+}]O_4$$

其中，(Mg_xFe_{1-x}) 处于四面体位，$[Mg_{1-x}Fe_{1+x}]$ 处于八面体位。x 的取值取决于烧结时淬火的温度和速度。当样品被退火时，x 约为 0.11；当样品被淬火时，x 约为 0.14。

由于烧结时淬火温度和冷却速度不同，$MgFe_2O_4$ 的饱和磁化强度 M_s 和居里温度 T_c 也不一样。一般情况下，M_s 在$(111.46\sim175.16)\times10^3$ A/m范围内变化，T_c 在 320～440℃之间变动。

$MgFe_2O_4$ 的共振线宽 ΔH 也与热处理方式有密切关系，它的单晶体线宽一般在 $(1.59\sim15.92)\times10^3$ A/m之间，多晶体线宽还与密度有关。

$MgFe_2O_4$ 的电阻率 ρ 随温度上升而迅速下降，室温时的 ρ 仅约为 $10^2\,\Omega\cdot m$。其他参数是：$\varepsilon\approx9.4$，$\tan\delta\approx0.051$，晶格常数为 8.50×10^{-10}m，x 光密度为 $5.00g/cm^{-3}$。

2）镁锰铁氧体是以镁铁氧体和锰铁氧体为基组合而成的，许多性质在两种铁氧体之间变化。$MgFe_2O_3$ 的 M_s 约为$(111.46\sim175.16)\times10^3$ A/m，$MnFe_2O_4$ 的 M_s 约为 398.1×10^3 A/m。原则上，Mg-Mn 铁氧体的 M_s 可在上述两值之间变化。考虑这种材料的其他性能，一般常用的 Mg—Mn 铁氧体的 M_s 在$(119.4\sim199.1)\times10^3$ A/m之间。

$MgFe_2O_4$ 的 T_c 为 320～400℃，$MnFe_2O_4$ 的 T_c 为 300℃。所以，Mg—Mn 铁氧体的 T_c 在 300～400℃之间。考虑到对这种材料其他性能的要求，真正有实用价值的 Mg—Mn 铁氧体在成分上都不是正分的，而是多 Mg 缺 Fe，这将使 T_c 下降到 250～320℃。

多晶体材料的共振线宽主要受磁晶各向异性和空隙度的影响。Mg—Mn 铁氧体的磁晶各向异性常数 K_1 较小（$10^3\sim10^4$ 尔格/厘米^3），又容易获得较高的密度（在一般工艺下，相对密度可达 98%），故共振线宽较低。常用 Mg—Mn 铁氧体材料的线宽 ΔH 在$(11.9\sim39.8)\times10^3$ A/m范围。

Mg—Mn 铁氧体的电阻率一般都很高，可达 $10^6\sim10^{10}\,\Omega\cdot m$。少量的 Mn 含量可抑制二价铁离子的生成，有利于提高电阻率，但 Mn 含量的继续增加会使电阻率迅速下降，因此在 Mg—Mn 铁氧体中不宜含有过多锰的成分。

由上述可知，Mg—Mn 铁氧体是一种性能较好的微波铁氧体材料。其中，一种具有重要实用价值并且被称为 S. E. R. L. 1009 的 Mg—Mn 铁氧体成分是 $Mg_{0.9}Mn_{0.1}Fe_{1.6}O_{4\pm\delta}$。这种材料的共振线宽、电阻率、密度与烧结温度、烧结气氛有密切关系。典型的制备工艺为：在 1350℃氮气中烧结，以形成高密度。然后在 1350℃氧气中保温 1h，使电阻率由 $10\,\Omega\cdot m$ 升至 $10^5\,\Omega\cdot m$。最后在 700℃氧气中保温 16h，以使电阻率进一步升至 $10^6\,\Omega\cdot m$。按照这一工艺制备的 S. E. R. L. 1009 材料的 ΔH 约为 39.8×10^3 A/m。

为了使 Mg—Mn 铁氧体的 M_s 在更大的范围内变化以适应不同频率的要求，可以用 Al^{3+}、Cr^{3+} 取代部分 Fe^{3+}，以 Zn 取代部分二价金属离子。下面分别介绍：

1）在 $MgFe_2O_4$ 的基础上以 Al^{3+} 取代 Fe^{3+} 便形成 Mg—Al 铁氧体。这种取代的结果是：饱和磁化强度 M_s 降低，同时居里温度 T_c 也随之下降，电阻率 ρ 则明显上升。Mg—Al 铁氧体的缺点是密度较低，即使在 1300℃以上的温度下烧结，其密度也仅约 $4.0g/cm^3$ 左右。由于密度低，这种材料的线宽 ΔH 一般都在 35.8×10^3 A/m以上。以上这些特点决定了这种材料适宜用在 S 波段的高功率器件中。典型成分为 $MgAl_{0.3}Fe_{1.7}O_4$，这一成分的材料性能为：$M_s\sim75.6\times10^3$ A/m，$T_c\sim240$℃，$\Delta H\sim35.8\times10^3$ A/m，表观密度 $D\sim3.5g/cm^3$，电阻率 $\rho\sim10^7\,\Omega\cdot m$，可承受 1MW 的脉冲功率。

为了提高 Mg—Al 铁氧体的密度，降低线宽 ΔH，可在 Mg—Al 铁氧体中加入少量 Mn，组成 Mg—Mn—Al 系尖晶石型铁氧体。和 Mg—Al 铁氧体相比，Mg—Mn—Al 铁氧体具有更高的密度，ΔH 也相应下降，并且电阻率进一步提高。美中不足的是居里温度下降。例如，当 $MgMn_{0.1}Fe_{2-x}Al_xO_4$ 中的 $x=0.3$ 时，居里温度 T_c 仅约为 190℃。

由于 Mn 的作用，Mg—Mn—Al 铁氧体的电阻率可高达 $10^8\,\Omega\cdot m$，密度可增至 $4.36g/cm^3$，共振线宽 ΔH 有明显的下降，介电损耗 $\tan\delta$ 一般在 10^{-4} 左右。

Mg—Mn—Al 铁氧体和 Mg—Al 铁氧体的烧结温度一般在 1350℃以上。为了降低烧结温度，进一步改善性能，可用少量 Cu 取代一部分 Mg。当取代量达到 10%克分子时，烧结温度将下降到 1300℃以下。

2）用 Cr^{3+} 取代 $MgFe_2O_4$ 中部分 Fe^{3+} 同样可降低 M_s。成分为 $MgCr_{0.64}Fe_{1.36}O_4$ 的材料在 1300～1350℃下烧结，所得 Mg—Cr 铁氧体的性能为：M_s 约为 47.8×10^3 A/m，T_c 约为 160℃，电阻率 $\rho>10^6\,\Omega\cdot m$，表观密度 D 约为 $3.3g/cm^3$，线宽 ΔH 约为 $(20.7\sim22.3)\times10^3$ A/m。

在 Mg—Cr 铁氧体中加入少量 Mn 可以抑制 Fe^{2+} 的生成，有利于提高电阻率。同时，也有利于提高材料的密度，以降低共振线宽 ΔH。

在 Mg—Cr 铁氧体和 Mg—Mn—Cr 铁氧体中用 Cu^{2+} 取代少量 Mg^{2+} 可降低烧结温度，提高密度，从而使共振线宽 ΔH 进一步降低。例如，$Mg_{0.8}Cu_{0.2}Cr_{0.64}Fe_{1.36}O_4$ 铁氧体的密度为 $3.8g/cm^3$，ΔH 约为 14.3×10^3 A/m。

在某些应用场合，需要材料具有高饱和磁化强度。为此，可在 Mg—Mn 铁氧体中适当增加 Mn 含量，减少 Mg 含量，并添加少量 Zn，这就形成了 Mg—Mn—Zn 铁氧体。这种铁氧体在较低的温度下烧结便可获得大晶粒、高密度，因而对降低线宽 ΔH 是有利的。但随着 Zn 的加入，居里温度将随之下降。下表列出两种成分的 Mg—Mn—Zn 铁氧体的性能。

表 2.5-2　两种 Mg—Mn—Zn 铁氧体的性能

成分（质量比）				$4\pi M_s$ (kA/m)	ΔH [(1000/4π) A/m]	T_c (℃)	烧结温度—时间
Fe_2O_3	$MnCO_3$	MgO	ZnO				
54	27	6	13	3000	60	—	1370℃—5h
55	39.46	4.67	0.87	2500	270	320	1100℃—4h

(2) Ni 系尖晶石型铁氧体。Ni 系尖晶石型铁氧体也是一种广泛应用的微波铁氧体材料。Ni 系铁氧体具有较高的 M_s，因此多用于高频波段。另外，Ni 系铁氧体具有小晶粒、低密度和高居里温度等特点，适宜用于高功率器件。

Ni 系铁氧体是在 $NiFe_2O_4$ 基础上发展起来的：

1) 在 $NiFe_2O_4$ 中由于 Ni^{2+} 具有强烈地占据八面体间隙（B 位）的趋势，故化学正分的 $NiFe_2O_4$ 属于“反型”分布的尖晶石结构。多晶 $NiFe_2O_4$ 具有较高的饱和磁化强度，M_s 约为 278.7×10^3 A/m。居里温度也很高，T_c 为 585℃。纯 $NiFe_2O_4$ 的电阻率更低，ρ 仅约为 $10^2\Omega\cdot m$，并且与烧结温度有关。为了提高电阻率，须抑制 Fe^{2+} 的产生，通常采取如下措施：在配方中使铁含量低于正分值；加入少量的锰或钴；低温烧结或在氧气中烧结。通过以上措施可使电阻率 ρ 达到 $10^7\Omega\cdot m$。镍铁氧体的介电性能与冷却方式有关。在 1200℃下淬火，$\varepsilon\sim14$；缓慢冷却，$\varepsilon\sim9$。这种材料的磁晶各向异性较小且随温度有显著变化。在室温下，磁晶各向异性常数 $K_1\sim-5\times10^3$ J/m³。按一般工艺生产的镍铁氧体是一种细晶粒并且多孔的材料，因而共振线宽 ΔH 较大，室温下 x 波段的 ΔH 约为 35.8×10^3 A/m。为了克服这种材料相对密度低的缺点，可加入少量的助熔剂 CuO。曾在 2cm 小型化波导隔离器上用过的材料配方为：$Ni_{0.9}Cu_{0.1}Mn_{0.02}Co_{0.02}O_{4\pm\delta}$。微量 Co 的加入既可抑制 Fe^{2+} 的产生，又可降低磁晶各向异性常数 K_1，从而起到降低 ΔH 的作用。这一材料的性能为：M_s 约为 $(215.0\sim230.9)\times10^3$ A/m，ΔH 降到 15.9×10^3 A/m以下，相对密度在 98%以上，电阻率 ρ 可达 $10^9\Omega\cdot m$，介电常数 ε 约为 11.5，介电损耗 $\tan\delta$ 约为 2×10^{-3}。

2) 欲提高 $NiFe_2O_4$ 的饱和磁化强度，可加入少量的 Zn 取代 Ni。$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ 的饱和磁化强度 M_s 随 Zn 含量的变化示于图 2.5-12。其居里温度随 Zn 含量的增加而下降。当式中的 $x=0.4$ 时，$T_c\sim350$℃。共振线宽也随 Zn 含量明显变化。当 $x=0.4$时，ΔH 出现最小值，此值约为 11.9×10^3 A/m。

一种可用于八毫米三端环行器的典型 Ni-Zn 铁氧体的成分为 $Ni_{0.6}Zn_{0.35}Cu_{0.05}Fe_{1.9}O_{4\pm\delta}$。这种材料的性能为：$M_s$ 约为 398.1×10^3 A/m。ΔH 约为 9.6×10^3 A/m，T_c 约为 375℃，ε 约为 12.5，$\tan\delta$ 约为 0.001。它可用作 15～36GHz 频段微波器件的磁介质。

3) 用 Mg^{2+} 取代 $NiFe_2O_4$ 中的部分 Ni^{2+}，就形成了 Ni-Mg 铁氧体。该铁氧体的离子分布为：

$$Fe^{3+}\left[Fe^{3+}Ni_{1-x}^{2+}Mg_x^{2+}\right]O_4$$

括号外的 Fe^{3+} 占据 A 位，括号内的 3 种金属离子占据 B 位。不难理解，随着非磁性离子 Mg^{2+} 取代磁性离子 Ni^{2+} 量的增加，饱和磁化强度降低。但由于这种取代不会对 Fe^{3+} 离子之间的交换作用产生太大影响，故居里温度仍然保持着相当高的数值。

Ni—Mg 铁氧体与 Ni 铁氧体相似，由于细晶粒和多孔性，相对密度较低。所以共振线宽一般在 39.8×10^3 A/m以上。而介电损耗与成分有密切关系。实验表明，当 $x=0.25$ 时，介电损耗最小，因此通常采用这一成分。

正因为 Ni—Mg 铁氧体具有较高的居里温度，在结构上具有细晶粒和多孔性的特点，所以它特别适用于作为高功率器件的介质和高温度稳定性器件的介质。一种典型的 Ni—Mg 铁氧体的成分是 $Ni_{0.75}Mg_{0.25}Fe_{1.9}O_{4\pm}$，它的性能为：$M_s$ 约为 143.3×10^3 A/m，ΔH 约为 47.8×10^3 A/m，T_c 约为 540℃，ε 约为 14，可在 x 波段的高功率器件中用作介质。

4) 从微波器件能够承受较大功率出发，要求磁性材料有较大的 $\Delta H_K/M_s$（其中 ΔH_K 为自旋波共振线宽）。然而 ΔH 的增大不利于器件的优值（隔离器中反向与正向能量损耗之比）。为了解决这一矛盾，可在 Ni 铁氧体中加入少量 Co。这就组成了 Ni—Co 铁氧体。在分子式 $Ni_{1-x}Co_xMn_{0.02}Fe_{1.9}O_{4\pm}$ 中，随 x 值由 0.01 增加到 0.05，$\Delta H_K/M_s$ 近似于线性增加，而 ΔH 在 $x=0.03$ 附近出现极小值，使 ΔH 降到 15.9×10^3 A/m以下。可见，利用 $x=0.03$ 成分的 Ni-Co 铁氧体做介质，既可使器件承受较高的功率，又可获得较好的器件优值。这种材料的典型参数是：M_s 约为 238.9×10^3 A/m，ΔH 约为 15.9×10^3 A/m，T_c 约为 590℃，ε 约为 13，$\tan\delta$ 约为 2×10^{-3}。由于该铁氧体的 M_s 较高，故只能用于 x 波段以上的频率。

5) 用 Cu^{2+} 取代 Ni 铁氧体中的部分 Ni^{2+}，可使 M_s 降低，烧结温度下降，密度提高。成分为 $Ni_{1-x}Cu_xMn_{0.02}Fe_{1.9}O_{4\pm\delta}$ 铁氧体的 M_s 随 Cu 含量的变化示于图 2.5-13 中。图中连接三角形的线是对密度做修正以后的结果。我们看到，当 $x>0.4$ 时，修正后的 M_s 高于理论值（虚线所示）。这时因为部分铜在高温下挥发，铁含量相对增加，以致出现了 Fe_3O_4，所以 M_s 上升。Cu^{2+} 除了有助熔作用以外，它在高温时还有从八面体间隙（B 位）向四面体间隙（A 位）扩散的特性。所以这种材料的 M_s 与烧结时淬火温度、冷却速

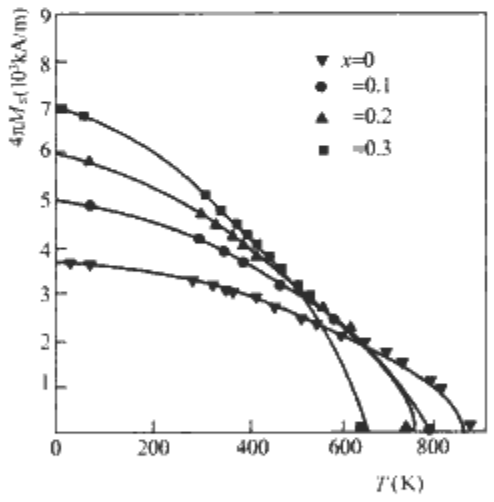


图 2.5-12 $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ 的饱和磁化强度 $4\pi M_s$ 随组成和温度的变化

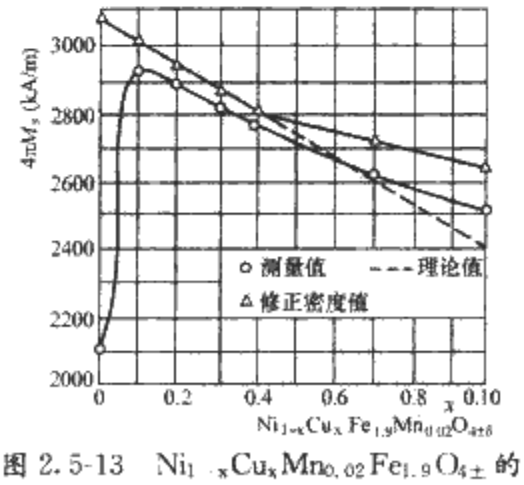


图 2.5-13 $Ni_{1-x}Cu_xMn_{0.02}Fe_{1.9}O_{4\pm}$ 的 $4\pi M_s$ 随成分的变化

度有密切关系。

Ni—Cu 铁氧体的电阻率随 Cu 含量的增加而急剧变化。当 Cu 含量在 $x=0.2$ 时，电阻率有较高的数值。所以，常用的 Ni—Cu 铁氧体的含 Cu 量都在 $x=0.2$ 附近，此时 M_s 均在 222.9×10^3 A/m以上，故这种铁氧体只能用于 x 波段以上的频率范围。又因为该材料的相对密度高，ΔH 较小，所以通常应用于低功率器件。

6）用 Al^{3+} 取代 $NiFe_2O_4$ 中部分 Fe^{3+}，于是形成了 Ni-Al 铁氧体。由于 Al^{3+} 有较强的占据八面体间隙（B 位）的趋势，因而随 Al 含量的增加 M_s 下降。按理论计算，当 $NiFe_{2-x}Al_xO_4$ 中的 $x=0.4$ 时，A 位和 B 位的磁矩相等，因而饱和磁化强度 M_s 为零。实际上，由于 Al^{3+} 并不全部进入 B 位，因而 $M_s=0$ 的实测位置在 $x=0.7$ 处。当 $x>0.7$ 时，A 位磁矩大于 B 位磁矩，饱和磁化强度又重新出现。存在成分抵消点附近，共振线宽 ΔH 和有效 g 因子将发生剧烈变化，失去了使用价值。因此，可将 Ni-Al 铁氧体的可用成分范围分成两部分，它们各自的性能如表 2.5-3 所示。

表 2.5-3　　Ni—Al 铁氧体的性能

成分 $NiFe_{2-x}Al_xO_4$	M_s (79.6 A/m)	ΔH (79.6 A/m)	T_c (℃)	g_{eff}	ε	使用频段
$0.0<x<0.4$	1000～2500	300～800	400～550	2.3～2.7	～12	S，X 波段
$0.7<x<1.0$	350～500	150～250	180～280	～1.5	～8	L 波段

在 $NiFe_{2-x}Al_xO_4$ 中加入少量的 Mn 和 Co 会使性能大为改善。例如，在上述材料中，加入 0.02 的 Mn，可使 ΔH 和 g_{eff} 大幅度降低；加入 Co 也可使 ΔH 明显降低。

7）在 $NiFe_{2-x}Al_xO_4$ 中加入一部分 Ga 可使成分抵消点向高含 Al 量区域移动。例如，在 $NiFe_{2-x}Al_{x/2}Ga_{x/2}O_4$ 中，成分抵消点在 $x=2$ 附近。当取 $x=1$ 时，这种材料的性能如下：M_s 约为 119.4×10^3 A/m，T_c 约为 200℃，ΔH 约为 20.0×10^3 A/m，g_{eff} 约为 2.4，可用于 S 波段及其以上波段。

（3）Li 系尖晶石型铁氧体。Li 系铁氧体的突出特点是居里温度高，这就为研制高功率和高温度稳定性的材料提供了有利条件。但迄今对这类材料的研究尚不充分，因此在应用方面也不够广泛。

1）Li 系铁氧体是在 Li 铁氧体 $Li_{0.5}Fe_{2.5}O_4$ 的基础上发展起来的。$Li_{0.5}Fe_{2.5}O_4$ 在晶位上的离子分布是：

$$Fe^{3+}[Li^{1+}_{0.5}Fe^{3+}_{1.5}]O_4$$

括号外的 Fe^{3+} 占据四面体间隙（A 位），括号内的 $Li^{1+}_{0.5}$ $Fe^{3+}_{1.5}$ 共同占据八面体间隙（B 位）。在 750℃以上，处于 B 位上的 Li^{1+} 和 Fe^{3+} 是无序分布的。如果从这个温度快速淬火，那么这些离子仍将保持无序状态。如果缓慢冷却，那么离子将有序分布：沿［111］晶轴方向每隔 3 个 Fe^{3+} 排布一个 Li^{1+}。这种在磁结构上的有序、无序状态对磁性有很大影响。

Li 铁氧体的 M_s 随温度升高而减小，室温下的 M_s 约为 278.7×10^3 A/m。居里温度为 670℃，x 光密度为 4.75 g/cm³，磁晶各向异性常数 K_1 随温度升高而减小，室温下 K_1 约为 -10^4 J/m³。

Li 铁氧体的主要缺点是电阻率很低，线宽 ΔH 很大，介电损耗和磁损耗都太大，饱和磁化强度 M_s 又相当高。因此，单纯的 Li 铁氧体尚无法使用。

2）为了降低 Li 铁氧体的饱和磁化强度，可用 Al^{3+} 代换其中的一部分 Fe^{3+}，组成 $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Al_xO_4$。随含 Al 量逐渐增加，$M_s$ 急速下降。在 $x=1.0$ 附近出现成分抵消点，这时 M_s 为零。然后，当 Al 含量继续增加时，M_s 又缓慢上升。居里温度一直随 Al 含量的增加而下降。这种材料的一个重要特点是：在 M_s 降低到 15.9×10^3 A/m时，T_c 仍保持在 400℃左右。

Li—Al 铁氧体的主要缺点是，当 M_s 随 Al 含量增加而降低时，共振线宽 ΔH 一直在增加。这一缺点限制了这种材料的应用。

3）为了在降低 Li 铁氧体的 M_s 的同时，也使 ΔH 减小，可用 Ti^{4+}（或 Sn^{4+}）来取代部分 Fe^{3+}，形成 Li—Ti（或 Sn）铁氧体。在 Li—Ti 铁氧体 $Li_{1-0.5x}Fe_{1+1.5x}Ti_{1-x}O_4$ 中，随 Ti 含量的增加，材料的 M_s、ΔH、有效 g 因子，ε_r 以及介电损耗 $tg\delta$ 都将随之减小。当 M_s 减小到 43.79×10^3 A/m 时，居里温度仍保持在 300℃以上，ΔH 约为 35.8×10^3 A/m。在同样情况下，Li—Al 铁氧体的线宽 ΔH 高达 79.6×10^3 A/m。

在 Li—Ti 铁氧体中，用 Zn^{2+} 取代部分（$Li^{1+}_{0.5}Fe^{3+}_{1.5}$），可使 ΔH 降低，但 M_s 有所增加。用 Al^{3+} 取代部分 Fe^{3+}，可使 ΔH 和 M_s 同时降低。

Li—Ti 铁氧体的一个重要特点是它的磁致伸缩系数特别小，适合在相移器中应用。因为在这种器件中，铁氧体块被银嵌在波导管内。在高功率下，波导管将因热膨胀对铁氧体块产生应力。这种应力通过铁氧体的磁致伸缩效应使相移下降。采用 Li—Ti 铁氧体可避免这一现象。

4）为了改善 Li 铁氧体的性能，有时还添加一些元素，如 Zn、Mn、Co、Ni、Bi 等。

加入少量 Zn，可以降低室温下的饱和磁化强度；还可以降低磁晶各向异性常数、提高材料密度，从而降低共振线宽。加入 Zn 后的不利影响是降低了居里温度和磁滞回线的矩形度。

加入少量 Mn，可以避免二价 Fe 离子出现，有利于减少介电损耗。另外，加入 Mn 可以减小磁致伸缩系数，降低材料对应力的灵敏度。

加入 Bi 的主要功能是降低烧结温度，促进晶粒生长，提高材料密度，因而有利于降低共振线宽。同时对防止二价 Fe 离子的出现、降低介电损耗也是有利的。

将有代表性的 Li—Ti 铁氧体的成分、性能列于表 2.5-4，以供参考。

1.3　微波铁氧体非互易器件

被磁化的铁氧体介质在微波波段表现出了一些特殊的效应。这些效应主要有：铁磁共振效应，场移效应，相移效应，法拉第旋转效应和科顿——毛顿效应。当我们把铁氧体介质置于电磁波传输线的某些特殊位置时，上述效应有可能对正反向传输的电磁波在场形上、位相上或能量损耗上产生不同的影响，利用这些不同的影响可以制作非互易器件。例如，利用正反向传输的电磁波在能量损耗方面的不同制造隔离器，利用正反向传输的电磁波在场强分布方面的不对称制造环行器，利用正反向传输的电磁波在位相变化方面的不同制造非互易相移器等。这些非互易器在微波线路中的应用为 20 世纪 50 年代以来微波技术的发展起了巨大作用，下面对这类器件做一简要说明。

表 2.5-4 $(LiFe)_{0.85-0.5x}Zn_xMn_{0.02}Fe_{0.6-y}Al_yTi_{0.7}O_{4\pm\delta}$ 的性能与成分的关系

成分		$4\pi M_s$	ΔH	g_{eff}	T_c	密度
x	y	(kA/m)	($\frac{1}{4\pi}$kA/m)		(℃)	(g/cm³)
0.000	0.10	393	425	2.08	247	3.20
0.025	0.10	442	370	2.05	228	3.27
0.050	0.10	495	325	2.05	228	3.33
0.075	0.10	530	300	2.04	207	3.36
0.100	0.10	545	285	2.03	199	3.21
0.025	0.15	333	280	2.04	188	3.21
0.050	0.15	387	255	2.03	190	3.33
0.075	0.15	422	245	2.02	177	3.32
0.100	0.15	465	225	2.02	172	3.38

1.3.1 隔离器

隔离器是微波线路中广泛应用的一种非互易器件，其作用是防止微波线路下端器件反射回的电磁波影响上端器件的正常工作。因此，要求正向传输电磁波的能量损耗越小越好，反向传输电磁波的能量损耗越大越好。此外，还要求器件本身对电磁波的反射越小越好。具体地说，设电磁波沿隔离器的正向传输，输入功率为 P_0，输出功率为 P_1，被隔离器反射回去的功率为 P_2，则定义：

正向（插入）损耗：$a_+ = 10\log\frac{P_0}{P_1}$ （dB）

驻波系数：$\rho = \left(1+\sqrt{\frac{P_0}{P_2}}\right)\Big/\left(1-\sqrt{\frac{P_0}{P_2}}\right)$

反过来，如果电磁波沿隔离器的反向传输，输入功率为 P_0，输出功率为 P_1，则定义

反向隔离损耗：$a_- = 10\log\frac{P_0}{P_1}$ （dB）

显然，a_+ 越小越好，一般要求 $a_+ < 0.5$dB；a_- 越大越好，一般要求 $a_- > 20$dB；ρ 越近于 1 越好，一般要求 $\rho < 1.20$。除以上技术参数外，还要求隔离器有一定宽度的使用频率范围和一定大小的承受功率。

依照隔离器的工作原理，可将其分为共振式、场移式、法拉第旋转式三种类型。目前常用的是前两种类型，下面分别说明。

(1) E 面共振式隔离器。E 面共振式隔离器是一种波导式隔离器，其结构如图 2.5-14 所示。将铁氧体块放在波导的一侧，使其垂直于波导的宽边，沿垂直波导宽边的方向加恒定磁场。当铁氧体块的尺寸和位置、恒定磁场的强度等选择适当时，就构成一个隔离器。这是因为，在矩形波导中传输的基本波型是 TE_{10} 型波，其磁场分布如图 2.5-15 所示。对图中的 p 点来说，当信号沿箭头方向传输时，微波磁场为左圆偏振，无论恒定磁场大还是小都不会发生铁磁共振，信号可正常通过。当信号沿与箭头相反的方向传输时，微波磁场为右圆偏振，p'点和 p''为右圆椭圆偏振。当恒定磁场的强度与微波频率满足一定条件时，在 p 点附近便发生铁磁共振。这时，铁氧体对微波能量的吸收达到极大值，然后将所吸收的能量变为热能，因而信号难以通过。这便形成了一个隔离器。E 面共振式隔离器的性能取决于铁氧体介质的各种参数、铁氧体块的尺寸和位置、恒定磁场的大小等。隔离器的性能有时用其优值来表示，它被定义为：

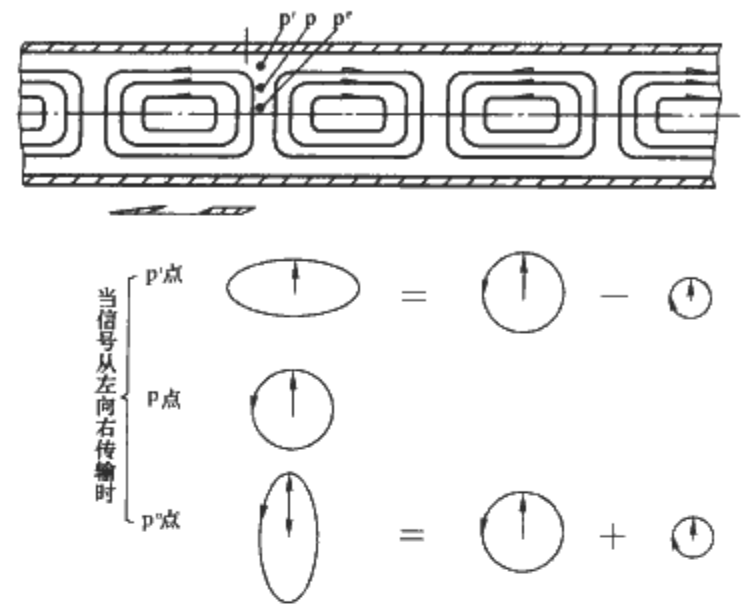


图 2.5-15 矩形波导中传输 TE_{10} 型波的磁场偏振情况

$$R = \frac{a_-}{a_+} \tag{2.5-23}$$

对于共振式隔离器，存在如下关系：

$$R = \left(\frac{4\omega}{\gamma\Delta H}\right)^2 \tag{2.5-24}$$

式中：ω 为微波信号频率；γ 为旋磁比。可见，为提高隔离器的优值，应尽量选择 ΔH 小的材料。但 ΔH 小，使用频率范围将变窄，这是互相矛盾的。

E 面共振式隔离器的主要缺陷是工作频率范围较窄。这是因为在这种隔离器中铁氧体介质较薄，铁氧体所在区域的静磁场基本上是均匀的。因此，与之对应的共振频率变化范围小，再加上为了提高器件优值而采用 ΔH 小的材料，这就使这种器件在本质上成为一种窄带器件。作为这类器件的一个例子，下面列出 $L\times M11$ 型隔离器的性能：

工作频率范围 f：8600～9600MHz。

正向损耗 $a_+ \leqslant 0.4$dB。

反向隔离 $a_- \geqslant 22$dB。

驻波系数 $\rho \leqslant 1.10$。

承受功率：5kW（脉冲），5W（平均）。

工作温度：(−60～85)℃。

(2) H 面共振式隔离器。H 面共振式隔离器的结果如图 2.5-16 所示。两个铁氧体长条分别置于矩形波导 H 面（即宽面）的上下两边。沿垂直 H 面方向加恒定磁场，磁场强度从波导窄边起到波导中心逐渐减弱，形成一定的梯度。这样，当微波信号频率较高时，靠近波导边缘的铁氧体将发生铁磁共振；当微波信号频率较低，靠近波导中心的铁氧体将发生铁磁共振。于是，就构成了一个宽频带的隔离器。

除了具有宽频带以外，H 面共振式隔离器的另一个更

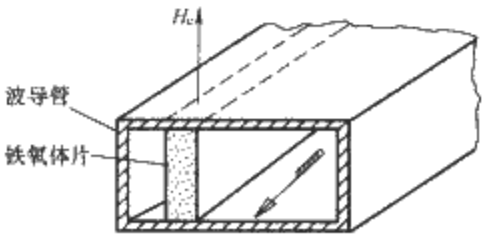


图 2.5-14 E 面谐振式隔离器的结构

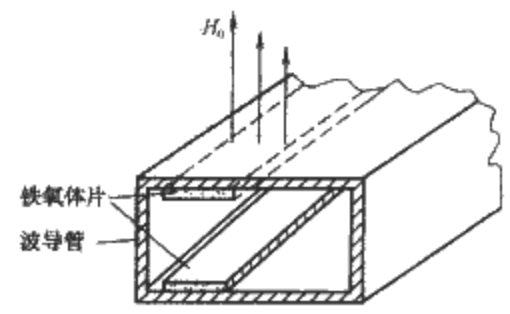


图 2.5-16 H 面共振式隔离器的结构

突出的优点是能够承受很高的功率。我们知道，隔离器总是存在正向损耗，这部分损耗能量将使铁氧体块的温度升高，以致使铁氧体的磁性能变坏，隔离器失去效能。但对于 H 面共振式隔离器来说，铁氧体片较薄，并与波导壁的接触面积很大，热量容易散发，故可承受很高的功率。作为这种器件的一个例子，我们给出 L×H7 型隔离器的性能：

工作频率范围：8200～12 400MHz。

正向损耗 $\alpha_+ \leqslant 1.0$dB。

反向隔离 $\alpha_- \geqslant 20$dB。

驻波系数 $\rho \leqslant 1.20$。

承受功率：25kW（脉冲），150W（平均）。

工作温度范围：(－60～125)℃。

(3) 场移式隔离器。在本章 1.1 中介绍过场移效应，当在矩形波导中放置一块磁化的铁氧体介质片时，由于铁氧体的旋磁效应，电磁场的场形将发生很大变化：电场沿波导宽面的分布不再是正弦型并且随传输方向而不同。当电磁波沿正向传输时，电场在铁氧体内及其表面处的强度明显减弱；当电磁波沿反向传输时，电场在铁氧体内及其表面处的强度明显增强。如果在铁氧体的表面放置一块电阻片以吸收电场能量，显然，对于正向传输的电磁波，由于电阻片所在处的电场很弱，它只吸收很小的能量；相反，对于反向传输的电磁波，由于电阻片所在处的电场非常强，它将吸收大量能量。这就构成了一个隔离器。下面列出 GL×－2 型场移式隔离器的性能：

工作频率范围：8600～9600MHz。

正向损耗 $\alpha_+ \leqslant 0.5$dB。

反向隔离 $\alpha_- \geqslant 20$dB。

驻波系数 $\rho \leqslant 1.15$。

承受功率：低功率。

工作温度范围：(－10～85)℃。

场移式隔离器在结构上有点类似 E 面共振式隔离器，但两者的工作原理不同，所加的磁场也不同。场移式隔离器属一低场器件，在三公分波段，所加磁场也不超过 $1000\times 10\frac{3}{4\pi}$A/m。正因为如此，场移式隔离器的体积小，对永磁体的性能要求也比较低。

1.3.2　环行器

环行器也是应用极广的一种微波铁氧体器件，它有三端式和四端式两种不同形式。环行器的功能是：从某一端口输入的微波信号沿固定的方向环行，然后从下一个端口输出，不允许微波信号在环行器中逆行。图 2.5-17 是矩形波导 H 面 Y 结环行器示意图，图 2.5-18 是同轴线板带 Y 结环行器示意图。在波导 H 面环行器中，3 支波导管互成 120°角，在波导相交的 Y 结中央有一圆柱形（也可为三角柱形）铁氧体，沿圆柱的轴向方向加一恒定磁场。当铁氧体的饱和磁化强度、几何尺寸以及外磁场的强度调节适当时，上述结构便构成一环行器。同轴板带环行器也相类似，3 个同轴接头彼此成 120°角，接头外导体与一金属圆盒相连，盒中有一金属圆板与同轴接头的内导体相连。在金属圆板的两侧各放置一铁氧体圆片，沿垂直于圆片的方向加恒定磁场。当上述结构的几何尺寸、铁氧体的饱和磁化强度、外磁场大小调配适当时，便成为一环行器。按照对这种器件的要求，从端口 1 输入的微波信号由端口 2 输出，从端口 2 输入的微波信号由端口 3 输出，从端口 3 输入的微波信号由端口 1 输出。因此，表征一个三端环行器的性能需要用 9 个参数：①端口 1 至端口 2、端口 2 至端口 3、端口 3 至端口 1 的 3 个正向损耗，记以 $\alpha_{\overrightarrow{12}}$、$\alpha_{\overrightarrow{23}}$、$\alpha_{\overrightarrow{31}}$；②端口 1 至端口 3、端口 3 至端口 2、端口 2 至端口 1 的 3 个反向隔离，记以 $\alpha_{\overleftarrow{13}}$、$\alpha_{\overleftarrow{32}}$、$\alpha_{\overleftarrow{21}}$；③3 个端口的驻波系数，记以 ρ_1、ρ_2、ρ_3。一般情况下，要求正向损耗 $\alpha^+ \leqslant 0.5$dB，$\alpha^- \geqslant 20$dB，驻波系数 $\rho \leqslant 1.20$。

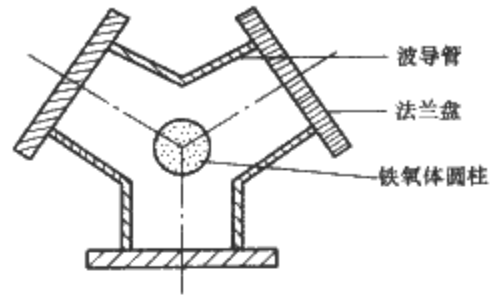


图 2.5-17　矩形波导 H 面 Y 结环行器示意图

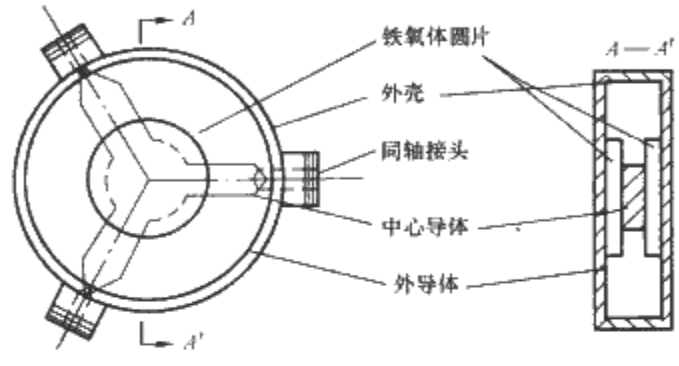


图 2.5-18　板带一同轴式 Y 结环行器示意图

Y 结环行器本质上是一个窄带器件。这是因为磁化后的铁氧体使 Y 结区域的阻抗变大，很难在较宽的频率范围内与传输线阻抗相匹配。为了展宽工作频率，对于波导 Y 结环行器来说，通常是在 Y 结区域的上方加盖一块金属三角板；对于同轴 Y 结环行器来说，通常是在铁氧体圆片的外围套一个四分之一波长的介质环。

Y 结环行器虽然已被广泛应用，但对其理论分析仍然很不完善。围绕着这一问题目前有四种方法：场论方法、散射矩阵方法、电路方法和集中参数方法。下面用场论方法对板带环行器的工作原理做一简单说明。板带传输的电磁波是 TE 型波，电场 E 垂直于板带，磁场 H 平行于板带，并且两者均垂直于传播方向。当电磁波由端口 1 输入后，在中央板带和上下两接地板之间形成了两个互为镜像的谐振腔，其中之一的电磁场分布如图 2.5-19 所示。由图可见，在大部分区域，磁场是椭圆偏振的。在小部分区域，磁场是线偏振

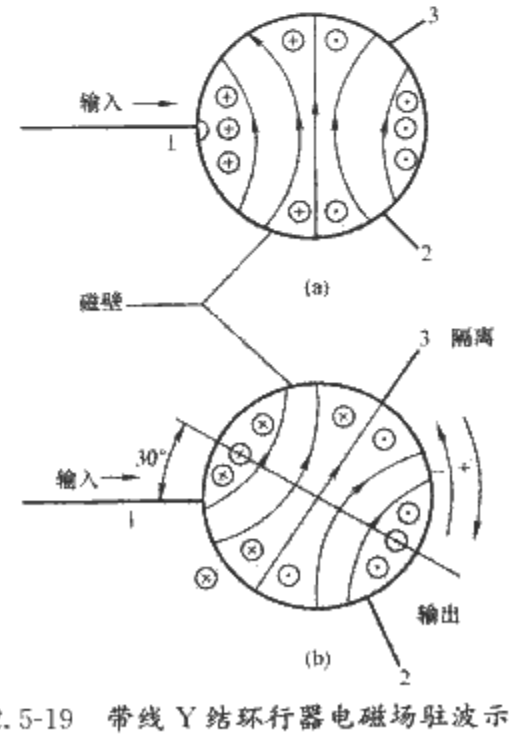


图 2.5-19　带线 Y 结环行器电磁场驻波示意图

(a) 未加磁场时；(b) 加适当偏磁场时

的。椭圆偏振可以分解为线偏振与圆偏振之和，线偏振可分解为左、右圆偏振之和。因此，谐振腔内的驻波磁场可分解为许多左、右圆偏振之和。如果在垂直于板带的方向加一恒定磁场，由于铁氧体对正、负圆偏振场有不同的磁导率，因而电磁场的驻波图形发生了旋转。调节恒定磁场的大小，使旋转角为 30°（图 2.5-19）。这时，端口 1 和端口 2 的电场大小相等，位相差为 180°，端口 3 的电场几近为零，于是便实现了环行作用。

在结头式环行器中，除了波导 H 面环行器和同轴板带环行器外，还有集中参数环行器和微带环行器。集中参数环行器适用于低频微波波段，微带环行器适合于和微带微波线路相连接。

除了上述结头式环行器以外，还有一种在高功率情况下广泛使用的相移式四端环行器，它是由铁氧体非互易相移器、三分贝电桥和擢叠双 T 组合而成的。该环行器可承受平均功率为 300W，脉冲功率为 300kW。由于它体积大、制作复杂，在小功率下很少使用。

1.3.3 相移器

如图 2.5-20 所示，在矩形波导中放置一块铁氧体介质，并沿垂直波导宽面的方面加恒定磁场，就构成一个相移器。这时，沿 $+y$ 方向传输的电磁波与沿 $-y$ 方向传输的电磁波磁导率不同，因而其相速度不同，当它们传输相同距离时便产生了相位差。根据微扰理论计算，传输单位距离的差相移 $\Delta\beta$ 与波导的尺寸、铁氧体介质的尺寸及张量磁导率有关。原则上，$\Delta\beta$ 可调为任何角度，实际上通常将 $\Delta\beta$ 调为下列角度之一：22.5°、45°、90°、180°。图 2.5-20 所示为 E 面非互易相移器，它所能承受的功率不够高。在高功率情况下，可采用 H 面结构的非互易相移器。在后一种结构的相移器中，铁氧体片被置于波导宽面的上下两壁上，外加恒定磁场垂直于铁氧体片。

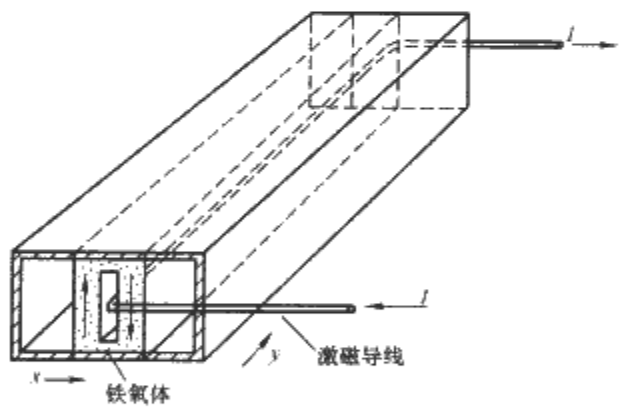


图 2.5-20 闭锁式非互易相移器示意图

非互易相移器的一个重要应用是由它组成相控阵天线，利用相控阵天线可以实现对侦察目标的无惯性扫描，这是目前雷达发展的一项新技术，下面加以简要介绍。

（1）如图 2.5-20 所示，把一个有中心方孔的铁氧体块放置在波导的中心，通过中心孔穿过一条导线，就构成了闭锁式非互易相移器。当导线中有电流通过时，导线两侧的铁氧体沿相反的方向磁化（如图 2.5-20 中的箭头所示），考虑到波导中左右两侧的微波磁场也方向相反，因此位于导线两边的铁氧体具有一致的相移效应。闭锁式非互易相移器所用的铁氧体为具有矩形磁滞回线的铁氧体，导线中的电流为正负脉冲电流。通过控制正向和反向脉冲电流可使铁氧体处于两种不同的剩磁状态。根据前面所做的分析，对应于这两种不同的剩磁状态，电磁波具有不同的相速度。因此，通过控制正向和反向两种不同的脉冲电流，可使电磁波产生差相移，差相移量的大小可通过改变铁氧体的长度来调节。图 2.5-21 给出了差相移量分别为 180°、90°、45°和 22.5°的一组闭锁式相移器。可以设想，如果将几千个这样的四位组合的相移器排成阵面，利用计算机控制系统控制每个相移器的磁化脉冲电流，便可以控制由阵面发出的电磁波束的形状和方位，以达到搜索、跟踪、测量和识别目标的目的，而这正是相控阵雷达所研究的内容。

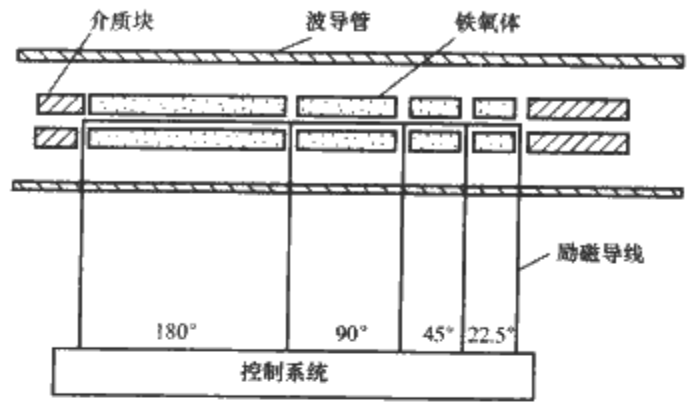


图 2.5-21 相控阵天线用的闭锁式相移器

闭锁式非互易相移器的主要优点是励磁电流为脉冲电流，这使控制系统所消耗的能量大为降低。在相控阵天线中有几千个相移器，控制系统需要消耗的能量以及这些能量所造成的控制系统的发热问题是研制相控阵天线所必须考虑的问题，采用闭锁式相移器使这个问题得到了较好的解决。与此有关的是，为了防止高功率击穿现象，这种相移器中的铁氧体片必须紧紧地嵌在波导壁上。这样一来，铁氧体片将因热膨胀而产生内应力，这一内应力通过磁致伸缩效应使铁氧体的磁滞回线改变形状，矩形度降低，从而对相移器的性能产生不利影响。为了解决这一问题，建议在选择铁氧体材料时采用磁致伸缩系数较小的 Li-Ti 尖晶石型铁氧体。

（2）除了上述非互易相移器以外，还有一种互易相移器。如图 2.5-22 所示，将一根铁氧体圆棒放在矩形波导的中心，沿铁氧体圆棒的轴向加恒定磁场，当电磁波通过铁氧体时便产生相移。这种相移与电磁波的传输方向无关，即不管电磁波沿 $+Z$ 方向还是沿 $-Z$ 方向传输，其相移量完全相同，我们称这种相移为互易相移。

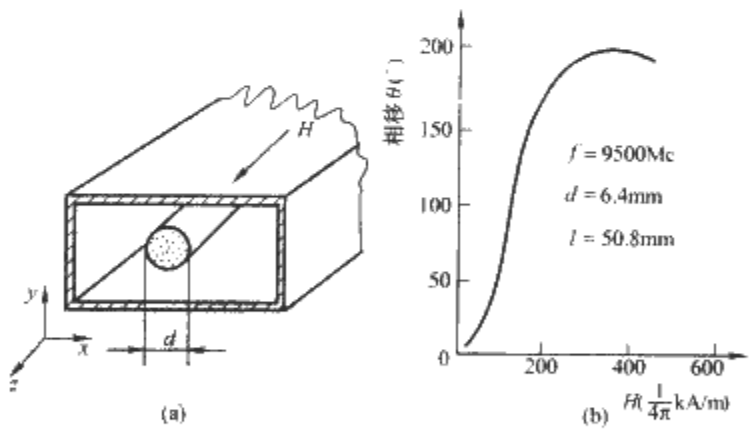


图 2.5-22 互易相移效应和相移器
（a）互易相移器；（b）互易相移效应

有关纵向磁化铁氧体互易相移器的严格理论尚不完全成熟，不再介绍。这种相移器有以下几个特点：

（1）在较小的恒定磁场下可获得较大的相移。例如，为了在三公分波段获得 180°的相移仅需要约 15.9×10^3 A/m的磁场。为了获得这样的磁场，通常采取在波导管外绕制线圈的方法。

（2）只能承受较低的功率。在这种相移器中，铁氧体位于波导的中心，这里是电磁场最强的地方，加之铁氧体具有集中电磁场的作用。因此，大部分电磁场能量通过铁氧体传

输。在功率较高的情况下，容易激发非线性效应，出现“次级”共振峰，使能量损耗骤然增加，破坏了相移功能。此外，在功率较高时，波导壁和磁棒之间容易被击穿。这也是该器件不能承受较高功率的重要原因。

(3) 铁氧体棒的直径不宜过大。实验表明，当铁氧体棒的直径小于 0.5cm 时，相移量很小；当其直径大于 0.5cm 时，相移量随棒的直径增加而迅速增加。但当棒的直径大于 0.8cm，相移量趋于一极限值，并且由于这时铁氧体棒集中了大量能量，容易产生高次谐波，使相移器的频率特性变差。所以，一般选择铁氧体棒的直径不超过 0.8cm。

纵向磁化铁氧体互易相移器属于窄带器件，目前尚没有展宽频带的有效方法。

2　磁记录材料

磁记录是利用强磁性材料的磁性质将信息输入并存储在磁介质中而且可以随时提取（输出）的一种设备。输入的信息可以是连续的，如声音、图像等；也可以是分立的，如计算机记录。前者称为模拟信息，要求线性响应，一般采用正弦波近似方法进行分析和处理；后者称为数字信息，需要用分立脉冲的方法进行记录和处理。

典型磁记录的基本原理如下：以电信号 $I(t)$ 的形式将信息（声音、像点、数字等）输入到记录磁头的线圈中，在磁头中产生一相应的磁信号，这一磁信号在磁头所留的空隙中暴露出来，当紧密靠近磁头空隙的涂有磁介质的带子以恒定速度平移时，便将其磁信号以磁化强度沿移动方向分布的形式 $M(x)$ 保留下来，从而起到记录的作用。当需要将信息输出时，将存有信息的磁带以与记录时相同的速度通过重放磁头的气隙，磁带中的磁化状态便在重放磁头中感生一个相应的磁通量变化 $\varphi(t)$，这一磁通量变化在重放磁头的线圈中产生一微弱的交变电压 $U(t)$，经电子线路放大后，即可获得与输入信息一样的输出信息，从而完成了重放的目的。

同其他记录方法（如光学摄影胶片记录、唱片录音记录等）相比，磁记录具有以下特点：

(1) 记录和存储的信息密度高，信息容量大。目前磁盘存储器的道密度已超过 2000TPI，位密度已超过44 000BPI，存储容量已超过 10^8。

(2) 输入和输出信息的速度快。对于磁盘，数据的存取时间在 ms 量级。

(3) 磁记录的重放（读出）过程属于非破坏性，可以反复重放上千次，不会破坏存储的信息；如果需要，也可随时将信息抹去，另存新的信息。

(4) 记录和存储信息的稳定性高，不易丢失；对环境因素（如温度、湿度、辐照等）要求不高，抗干扰能力强。

(5) 磁记录能够适用较宽的信号频率范围，从直流一直扩展到 15MHz；它的动态范围很宽，可以超过 40dB。

(6) 磁记录的使用寿命长，无“疲乏、老化”等现象，可以长时间和多次（$10^3 \sim 10^5$）使用。

(7) 磁记录的成本较低，维护简单，适于大量的生产和应用。

由于磁记录具有以上特点，因而得到广泛应用，主要用于以下几个方面：

(1) 磁录音。主要用于广播、电影、语言教学、音乐欣赏等方面。

(2) 磁录像。主要用于电视、传真、视听教学等方面。

(3) 电子计算机的外存储器。主要用于商务、气象、国防、科研、通信、医学等方面。

(4) 各种自动控制和遥控设备中的信息记录和传送。例如，记录人造卫星和宇宙飞船上各种数据并传送回地球，洲际或星际射电望远镜接收信息的实时记录等。

正因为磁记录应用广泛，它的全世界年产值早已超过了所有其他磁性材料的年产值。

2.1　磁记录材料的性能特征

由上面所介绍的磁记录的基本原理可知，磁记录中应用的磁性材料可分为两类：

(1) 磁记录介质材料。它是作为记录和存储信息用的材料。

(2) 磁头材料。它是把电信号转换为磁信号的材料或把磁信号转换为电信号的材料。

2.1.1　磁记录介质的性能特征

磁记录介质的主要性能特征：

(1) 矫顽力 H_c 必须适当高，以便有效地存储磁性信号，抵抗外界干扰，减少磁记录介质本身所存在的自退磁效应，提高信息密度。目前一般所用磁介质的 H_c 约在 16～80kA/m。如果 H_c>80kA/m，目前的磁记录磁头将难以把信息输入磁记录介质中。

(2) 饱和磁化强度 M_s 要足够高，以便获得高的输出磁信号，提高单位体积内的磁能密度。同时，高的 M_s 也会提高由形状各向异性导致的矫顽力。但 M_s 也不能太高，那样会增大自退磁效应。目前所用的铁氧体微粉的 M_s 在 200～2000kA/m 之间，金属微粉和金属薄膜的 M_s 在 2000kA/m 左右。

(3) 矩形比 M_r/M_s 高，以减小自退磁效应，提高信息记录效率。目前所用材料的矩形比一般在 0.7～0.9 之间。

(4) 比值 H_c/M_r 应尽量高，以提高记录信息的密度和分辨率，减小自退磁效应。

(5) 磁带回线应陡直，以使记录数字开关的磁场区域变窄，减小输出脉冲宽度，提高记录信息的分辨率。

(6) B_r 和 H_c 的温度系数低，老化效应小，以提高磁记录的稳定性和材料的使用寿命。

2.1.2　磁头材料的性能特征

磁头材料的主要性能特征：

(1) 最大磁导率 μ_m 高。以减小记录磁头的输入功率，并增加磁头气隙中的磁场。

(2) 饱和磁感应强度 B_s 高。以避免在信号幅度大时产生失真。同时，B_s 大也有利于提高记录磁头气隙中的磁场。目前所用磁头的 B_s 在大约 0.4T 左右。

(3) 矫顽力 H_c 小。这样可以减小磁头的损耗和剩磁，以降低剩磁引起的噪声。目前所用磁头材料的矫顽力 H_c 多数在 40A/m 以下。

(4) 剩余磁感应强度 B_r 低，以便较容易地抹去不需要的磁迹，降低噪声。

(5) 电阻率 ρ 高。以降低磁头中的涡流损耗，这对于改善高频响应特性特别重要。现用磁头的电阻率 ρ 多数在 $10^2 \sim 10^3\,\Omega \cdot cm$之间，个别的可达到 $10^7\,\Omega \cdot cm$。

(6) 起始磁导率 μ_i 高。以便提高重放磁头的灵敏度。现用材料的起始磁导率 μ_i 多数在 800～5000 之间，适用于高频材料的起始磁导率也有在 300 以下的。

(7) 起始磁导率的截止频率 f_c 高。以便于提高使用频率的上限，有利于高频高速磁记录。

(8) 机械强度高。这样可使材料具有耐磨特性，以延长磁头的使用寿命。

2.2 制备工艺

目前可用的磁记录介质分为三类：①铁氧体和其他强磁氧化物微粉；②强磁金属微粉；③磁性薄膜介质。

2.2.1 铁氧体和强磁氧化物磁粉

这类材料主要有 3 种：①γ—Fe_2O_3 磁粉；②CrO_2 磁粉；③包 Co 的 γ—Fe_2O_3 磁粉。它们的物理特性及制备工艺如下：

（1）γ—Fe_2O_3 磁粉。γ—Fe_2O_3 又称磁赤铁矿，呈黄褐色，其晶体结构可以看做是在 B 位上有空缺的反尖晶石结构，可表示为 $Fe_8^{3+}[(Fe_{4/3}^{3+}\square_{8/3})Fe_{12}^{3+}]O_{32}$。其中□为空位，[] 为 8 面体晶位，() 为 8 面体晶位中 1∶3 有序分布的一种组元，类似于有序的锂铁氧体。每个 γ—Fe_2O_3 中平均有 1/2 个 Fe^{3+} 对自发磁化有贡献，分子磁矩为 2.5μ_B。室温下的比饱和磁化强度 σ_s 为 73Am^2/kg，晶格常数 a 为0.833 8nm，x 光密度 ρ 为 4.98g/cm^3，居里温度 T_c 为 675℃，磁晶各向异性常数 $K_1=-4.64\times10^3 J/m^3$，易磁化方向为 [111] 轴方向。用作磁记录介质的 γ—Fe_2O_3 为针状微粉，长轴长约 0.25～1.00μm，短轴长约 0.1～0.3μm。由形状各向异性和磁晶各向异性计算的矫顽力分别为 80kA/m 和 8kA/m，实验值为 24～32kA/m。

制备 γ—Fe_2O_3 磁粉可通过制备中间化合物 α—FeOOH 或 γ—FeOOH 完成。

α—FeOOH 称为铁黄，属斜方晶系。生产这种材料有两种方法：晶种法（又称酸性法）和碱性法，分别介绍如下：

1）晶种法。这种方法分两个步骤，又称二步法。

第一步：将 $FeSO_4$ 溶于水，加少量 H_2SO_4，过滤。在搅拌中加入 NaOH，于是有

$$FeSO_4+2NaOH=Na_2SO_4+Fe(OH)_2\downarrow$$

为防止 Fe^{3+} 出现，上述反应在氮气保护下进行。

第二步：使温度保持在 32～45℃间，在 $Fe(OH)_2$ 中加水，通入空气并搅拌为 0.06～0.10mol/L，使产生如下反应：

$$2Fe(OH)_2+\frac{1}{2}O_2\longrightarrow 2\alpha\text{—}FeOOH+H_2O$$

将上述生成的 α—Fe_2O_3 晶种与铁屑、$FeSO_4$ 一起注入主反应槽，加热并吹入空气或氧气，以生成一定尺寸的 α—FeOOH，反应如下：

$$4FeSO_4+O_2+6H_2O=4FeOOH+4H_2SO_4$$

$$4H_2SO_4+4Fe+2O_2=4FeSO_4+4H_2O$$

$$4Fe+3O_2+2H_2O=4\alpha-FeOOH$$

2）碱性法。这种方法又称一步法，制备工艺如下：

将 $FeSO_4\cdot7H_2O$ 溶于纯水中，过滤，注入浓度为 3.625mol/L 的 NaOH 水溶液反应槽中，得 pH 值大于 12 的 $Fe(OH)_2$。升温至 45℃，通入空气并加以搅拌，即可得 α—FeOOH。

α—FeOOH 在 230℃-270℃进行脱水，得α—Fe_2O_3，保持针状不变；然后加热至 300～400℃，在氢气中进行还原，得针状 Fe_3O_4；最后在 250℃下重新氧化，便可得针状 γ—Fe_2O_3，即所需要的磁粉。

γ—FeOOH（纤铁矿）的制备也可采用类似于上述晶种法或碱性法的工艺进行。在制备出 γ—FeOOH 以后，通过脱水、在氢气中还原以及重新氧化，可得到 γ—Fe_2O_3 磁粉。

对 γ—Fe_2O_3 的表面处理和密实化是改善磁粉分散性的重要措施。表面处理就是用表面处理剂（如无机磷酸盐、硅酸盐等）包敷磁粉，形成单分子层，以提高磁粉的分散性。密实化就是用机械滚压或者挤压的方法把磁粉压实，以提高密度。堆集密度提高的最终结果是，磁带和磁盘的矩形比、灵敏度、分辨率和输出幅度有所提高。

（2）CrO_2 磁粉。CrO_2 为金红石型四角晶系结构，分子磁矩为 2μ_B，比饱和磁化强度 σ_s 约在 95～100Am^2/kg 之间，居里温度为 121℃，磁晶各向异性常数 $K_1=3\times10^4 J/m^3$，易磁化轴为 C 轴。矫顽力 H_c 主要来源于形状各向异性，因而在制备 CrO_2 磁粉的过程中非常重视颗粒的轴长比。

制备 CrO_2 磁粉有 3 种方法，即①热分解 CrO_2Cl_2；②在氧压下热分解 CrO_3；③在高温和氧压下热分解水合的 CrO_3。

通常采用最后一种方法，其工艺如下：将 CrO_3 和等体积的水密封在薄壁铂金容器中，加热到 400～525℃，压力为（5～30）$\times10^7$ Pa，使其产生下列反应：

$$CrO_3\xrightarrow{(加热，加压)}CrO_2+\frac{1}{2}O_2$$

使用铂金容器的目的是减小 CrO_2 晶粒的尺寸。为了改进 CrO_2 磁粉的性能，在制备过程中需要使用添加剂或催化剂。例如，添加 2%的 Sb_2O_3，可以获得长约 0.1～2.0μm、宽约 0.04～0.08μm 的针状磁粉，使矫顽力 H_c 达到 27.8kA/m；添加少量 RuO_2，可使反应温度降低到 340℃、压力降低到 3.5×10^7 Pa，从而使 H_c 提高到 32.2kA/m。

和 γ—Fe_2O_3 相比较，C_rO_2 磁粉的优点在于：

1）M_s 高，信号输出幅度大，高频响应好，高密度记录时的峰值位移小、分辨率高。

2）结晶完整、晶粒光滑，肯有很好的分散性和取向性，因而矩形度高（M_r/M_s 可达 0.90）。

3）材料的纯度高，晶粒尺寸均匀，轴比高（可达 20∶1），具有比 γ—Fe_2O_3 磁粉高得多的矫顽力（H_c 约为 23.8～55.7KA/m），从而提高了磁介质的信噪比，降低了噪音和复印效应。

CrO_2 磁粉的缺点是：

1）居里点低，对信息的记录和存储的可靠性产生不利影响。

2）表面硬度高，对磁头的磨损大。

3）CrO_2 易和水分、粘合剂中的氧发生驰豫离子变价效应，使磁性能的稳定性变弱。

CrO_2 磁粉尽管有以上缺点，但仍不失为一种很好的磁记录介质。

（3）包钴的 γ—Fe_2O_3 磁粉。包钴的 γ—Fe_2O_3 是在不断改进 γ—Fe_2O_3 磁粉表面处理的过程中被发现的。这种材料的最大优点是大幅度地提高了 γ—Fe_2O_3 的矫顽力。制备这种材料的主要工艺如下：将 γ—Fe_2O_3 磁粉放在含有 Co^{2+} 和 Fe^{2+} 的碱性溶液中处理，使 γ—Fe_2O_3 磁粉表面吸附一层 $Co(OH)_2$ 和 $Fe(OH)_2$，通过加热在 γ—Fe_2O_3 磁粉表面形成 $CoFe_2O_3$ 包敷层，而 Fe^{2+} 的存在是为了有利于钴铁氧体的层间耦合和 Co^{2+} 的扩散。上述过程的化学反应式如下：

$$CoSO_4+2NaOH=Co(OH)_2+Na_2SO_4$$

$$FeSO_4+2NaOH=Fe(OH)_2+Na_2SO_4$$

$$2Fe(OH)_2+\frac{1}{2}O_2=Fe_2O_3+2H_2O$$

$$Co(OH)_2+Fe_2O_3=CoFe_2O_4+H_2O$$

$CoFe_2O_4$ 与 γ—Fe_2O_3 同属于尖晶石结构，都是强磁性体。$CoFe_2O_4$ 与 γ—Fe_2O_3 具有更大磁晶各向异性和更大的分子饱和磁矩，因而导致了包钴以后的 γ—Fe_2O_3 有更大的矫顽

力和比饱和磁化强度。$CoFe_2O_4$ 晶格常数略大于 γ—Fe_2O_3 的晶格常数，为了保证在包敷 $CoFe_2O_4$ 的过程中有良好的晶格匹配，上述反应需要在高压反应釜中进行。为了防止 Co^{2+} 向 γ—Fe_2O_3 基体的内部扩散，可以在 γ—Fe_2O_3 磁粉包钴处理前先在其表面增加一层非磁性的保护膜（如 SiO_2），这样还会减少孔洞，使表面变得光滑，增加其分散性和定向性，因此得到了广泛运用。经包钴后的 γ—Fe_2O_3 磁粉，其矫顽力大约为 39.8～51.7kA/m。表 2.5-5 列出了包钴的 γ—Fe_2O_3 和 CrO_2 两种盒式磁带的技术性能。

表 2.5-5　包钴型 γ—Fe_2O_3 盒式带与 CrO_2 盒式带性能的比较

介质材料	δ (μm)	取向度	B_r (T)	H_c (kA/m)	S_R
包钴的 γ—Fe_2O_3	5.5	2.3	0.155	46.2	0.85
CrO_2	5.0	2.5	0.150	41.4	0.85

介质材料	最大输出电平		灵敏度		偏磁噪声 (dB)
	333Hz (dB)	10kHz (dB)	333Hz (dB)	10kHz (dB)	
包钴的 γ—Fe_2O_3	3.0	−9.0	2.0	1.5	−60
CrO_2	0.5	−10.0	0	0	−60

2.2.2　金属和合金磁粉

这类磁粉包括 Fe 粉、Fe—Co 粉和 Fe—Co—Ni 粉，其主要特点是：

（1）具有高的饱和磁感应强度。

（2）具有高的矫顽力。

因而，可利用这类材料改进脉冲分辨率，以提高磁记录的密度。这类材料的主要特点是在空气中的化学稳定性太差。同时，它在磁浆中的分散性也很差。由于上述问题长期没有得到解决，故一直未被实际应用。

2.2.3　磁性薄膜

在制备工艺上，它分为物理方法（包括真空蒸镀法、离子喷镀法和溅射反应法）和化学方法（电镀法和化学镀法），其特点是，磁性层的磁体密度高，磁层薄而均匀，附着力强，稳定性好，可有效地提高磁记录的密度，因而受到特别重视。

薄膜型磁介质按其材料又分为氧化物薄膜和合金薄膜两大类。下面介绍几种典型材料及其制备工艺：

（1）γ—Fe_2O_3 薄膜的制备。前面已经说明，γ—Fe_2O_3 具有作为磁记录介质的良好特性。在 γ—Fe_2O_3 薄膜中添加少量 Co、Ti、Cu 等元素则可进一步提高这种材料的矫顽力、剩余磁感应强度和矩形比。因之，制备掺钴的 γ—Fe_2O_3 薄膜的研究受到广泛重视，制备方法多采用溅射反应法。用射频溅射法制备掺钴的 γ—Fe_2O_3 薄膜的主要工艺如下：①用 Co—Fe 靶（含 Co 重量比为 2%）溅射出 α—Fe_2O_3 或 Fe_3O_4 薄膜；②对于 α—Fe_2O_3，需经氢气还原为 Fe_3O_4；③对 Fe_3O_4 在空气中进行热处理，使其氧化成为 γ—Fe_2O_3，这样所得薄膜的性能为：H_c 为 39.8～119.4kA/m，B_r 为 0.25-0.25T，S_R 为 0.8，属于高性能的磁性膜。

（2）金属和合金膜的制备。制备这种膜大多采用斜射的真空蒸镀法，系统的真空度要求达到 10^{-3}Pa 以上。对单一金属膜来说，钴膜和铁膜的性能较好。特别是钴膜，由于具有很强的单轴各向异性，容易控制结晶生长状态，因而受到广泛重视。但是，为了使蒸镀的钴膜具有较高的矫顽力，必须保持很大的入射角，这就使成膜速率变得很低。为了改变这一状况，通常选用 Co—Ni 合金（Ni 的摩尔比 $\gamma<50\%$）作为制备这类膜的母系金属。这类合金膜已经被用来制作微型录像磁带。

（3）Co—P 和 Co—Ni—P 薄膜的制备。Co—P 和 Co—Ni—P 薄膜通常用电镀法或化学镀法来制备。P 不溶于 Co 的点阵，P 的加入可使 Co 的细小晶粒被富 P 层分离，形成单畴或类似单畴状态，以提高矫顽力。

电镀法要求基底为电导体，常用这种方法以铝合金作基底制造硬磁盘。化学镀法不需要电源和电极，而是利用化学势进行沉积。在 Co—P、Co—Ni—P 薄膜的化学镀法制备中，大多数使用次磷酸钠作还原剂。在磁膜制成后，为了防止空气和水分对磁膜的腐蚀，通常在磁膜的外面加一保护层，如镀铬、镀镍或涂敷一层 SiO_2 等。作为例子，介绍一化学镀 Co—Ni—P 的硬磁盘，磁层厚 0.08μm，外涂 0.08μm 的 SiO_2 保护层，其技术性能为 $H_c\geqslant47.7$kA/m，$B_r=0.72$T，$S_R=0.8$，SNR>28dB。

第 6 章 磁 性 材 料 测 量

1 磁特性参数

在永磁材料的测试中，主要目标是获得全象限磁滞回线或退磁曲线 $B(H)$、$J(H)$ 曲线，通过磁滞回线或退磁曲线可以获得材料的基本磁学参量，如：剩余磁感应强度 $B_r = J_r$、矫顽力 H_{cJ} 和 H_{cB}、磁能积（BH）等。

在一般工业永磁测量中：剩磁 B_r、矫顽力 H_{cB}、内禀矫顽力 H_{cJ}、最大磁能积 $(BH)_{max}$ 以及回复磁导率 μ_{rec} 是最重要的五个磁特性参数。用这些磁参数可以对材料的磁性能做出基本评价。随着磁性材料在高技术领域方面应用的普及，人们对磁性材料的热稳定性（温度系数的测量）、退磁曲线的方形度、饱和磁化强度等问题也越来越重视起来。下面简要介绍硬磁材料主要磁特性参数的定义和确定方法。

1.1 剩磁

饱和磁滞回线上，磁场强度为零所对应的磁通密度的值称为剩磁；记作 B_r，单位为特斯拉（T）或高斯（G_s）。

值得注意的是：在磁测领域经常使用的另一词汇是剩余磁通密度，它定义了磁滞回线上 $H=0$ 所对应的磁通密度。从定义上说剩磁与剩余磁通密度的概念是有区别的。由于在非饱和磁化的情况下，对于同一材料可以得到一个磁滞回线族，与之相对应的剩余磁通密度可以有无穷多个。只有材料被饱和磁化后，剩余磁通密度才趋于一常数，即剩磁。但在实际测量中，将被测样品磁化到完全饱和有时是不可能的，因此引入了技术磁化饱和的概念。在技术磁化过程中，当外磁化场变化 50%时，B_r 的变化小于 1%，则认为样品已达到技术磁饱和状态。因为此时剩余磁通密度与剩磁在数量上的差别对测量结果的影响可以忽略不计。

确定剩磁的方法有多种，以下为两种普遍使用的方法：

（1）测量磁滞回线法：将材料制备成符合规定的试样，测量它的饱和磁滞回线，在回线上找到 $H=0$ 所对应的两个磁通密度值 B_1、B_2，设 B_h 为 B_1、B_2 两点间的高度，则：

$$B_r = \frac{B_h}{2} \tag{2.6-1}$$

这种方法最简单，它直接从定义出发，使用闭路 BH 仪，以及后面将要介绍的几种开路磁测仪器都可以实现。

（2）抽拉线圈法：将一个已知匝数的线圈套在样品上，样品置于电磁铁中。施加一外磁化场将样品饱和磁化，在 $H=H_m$ 的状态下，单调减弱磁场到零。可知此时样品所处的磁化状态为 $H=0$、$B=B_r$。打开电磁铁，从样品上抽出探测线圈到 $B=0$ 的空间，可得线圈内磁通变化：

$$B_r = \frac{\Delta\Phi}{NS} \tag{2.6-2}$$

式中：N 为线圈匝数；S 为横截面积。

此方法多用于稀土永磁的测量。

1.2 矫顽力 H_{cB}

饱和磁滞回线上，$B=0$ 所对应的磁场强度值为矫顽力，单位为 kA/m，记作 H_{cB}。对于矫顽力的标记有 H_c、bH_c、H_{cB}，根据 IEC 文件的推荐以及 GB 3217—1992 的规定，矫顽力用符号 H_{cB} 表示。

在永磁参数测量中矫顽力通常在磁滞回线或退磁曲线上来确定：

（1）在 $B-H$ 磁滞回线上的测量方法：根据 H_{cB} 的定义，在回线上找到与 H 轴交点处的磁场强度值，该值就是矫顽力。虽然矫顽力通常定义在磁滞回线的第二象限，但由于饱和磁滞回线是对称的．所以在实际测量时，为了消除磁场测量系统的零点漂移，取 $B=0$ 处 $B-H$ 磁滞回线的宽度的一半为矫顽力值。确定 H_{cB} 时，使用 B 探测线圈测量磁滞回线是极为方便的。

（2）$J-H$ 磁滞回线上 H_{cB} 的确定：在很多场合，用 J 线圈测量磁滞回线会大大提高测量精度。但此时直接测得的是 $J-H$ 磁滞回线或 $J-H$ 退磁曲线。在这种情况下可以利用关系式（2.6-3）计算出 H_{cB}。

$$B = \mu_0 H + J \tag{2.6-3}$$

作 $J=-\mu_0 H$ 直线，因为在该直线上总有 $B=0$ 的条件成立，因此该直线与 $J-H$ 曲线的交点处所对应的磁场强度就是 H_{cB}。

当坐标选取合适时，用这种方法确定 H_{cB} 也是很方便的，这种方法多用于稀土永磁材料的测量。

1.3 内禀矫顽力 H_{cJ}

内禀矫顽力定义为：饱和磁滞回线上，$J=0$ 处对应的磁场强度，用 H_{cJ} 表示。H_{cJ} 的确定方法与 H_{cB} 的相同，具体做法可参照 H_{cB} 的相关内容。

1.4 最大磁能积

最大磁能积是退磁曲线上，磁通密度 B 与相应的磁场强度 H 乘积的最大值，用 $(BH)_{max}$ 来表示。$(BH)_{max}$ 点的坐标为（H_d，B_d）。

最大磁能积从退磁曲线上确定。它有两个基本方法：

（1）直接计算法：作退磁曲线上 B 与 H 乘积的曲线，找到曲线的最大值。在使用此方法时，如果只对 $(BH)_{max}$ 感兴趣，可以不必做出整条磁能曲线。在（H_d，B_d）附近计算几点即可得到最大磁能积。

（2）等磁能曲线法：取 $E=BH$；式中当 E 为一常数时，在 $H-B$ 平面内可以得到一条等磁能曲线，即在该曲线上，磁能积为一常数。不断改变常数 E 时，我们可以得到一个等磁能曲线族。等磁能曲线族中与退磁曲线相切的曲线的磁能积值为最大磁能积。

用这种方法确定 $(BH)_{max}$，在实际应用中是较为方便的。因为可以预先在记录纸上做好等磁能曲线族，也可使用一个等磁能曲线板。只要测得退磁曲线，就可立即知道最大磁能积的值。但必须注意的是使用此方法很可能引入附加的读数误差。

1.5 回复磁导率

退磁曲线上某点在回复状态时的局部磁滞回线的平均斜

率与磁常数 μ_0 的比值称为回复磁导率；记作 μ_{rec}，无量纲。

回复磁导率的大小反映了材料在退磁曲线上的回复特性。虽然退磁曲线上各点的回复特性不大相同，相应的回复磁导率的大小也不一样。但一般说来，对于退磁曲线矩形较好的材料，它的回复磁导率在退磁场不大于最大磁能积所对应的磁场强度值时，近似为一常数。又由于永磁材料的工作点多设计在最大磁能积附近，因此人们对材料在最大磁能积附近的回复磁导率最为关心。

最大磁能积附近的回复磁导率的测量步骤为：

(1) 将样品饱和磁化后磁场从 H_m 减弱到零。

(2) 改变励磁电流方向，单调增加外磁化场到 H_d 的同时记录下退磁曲线。

(3) 在 $H=H_d$ 时，改变励磁电流方向，并将磁场强度减为零。在磁场强度由 H_d 变到零时，设磁通密度的改变量为 ΔB，则：

$$\mu_{rec}=\frac{\Delta B}{H_d\mu_0} \tag{2.6-4}$$

注：在定义回复磁导率时，没有规定磁场强度改变量 ΔH 的大小。为了测量方便，可以适当选取 ΔH 的大小。这种选取以不明显影响回复磁导率的测量为原则。

以上是在(H_d，B_d)点测量 μ_{rec} 的方法。它与退磁曲线上其他点的回复磁导率的测量方法基本一致。

1.6　方形度

通常将内禀退磁曲线上的点 $B_i=0.9B_r$ 相对应的磁场称为弯曲点磁场 H_k，通常用 H_k/H_{cJ} 可以直观地表示磁体的 J 退磁曲线方形度，H_k/H_{cJ} 越大（越接近于 1）意味着材料的内禀退磁曲线的方形度越好。H_k/H_{cJ} 也是永磁体的一个重要的磁特性指标，它表征了磁体在动态工作条件下的稳定性。

1.7　饱和磁化强度

在外磁化场不断增加的情况下，样品的磁化强度达到最大值并不再增加时称为饱和磁化。此时样品的磁化强度称为饱和磁化强度。但在实际测量中，将被测样品磁化到完全饱和有时是不可能的，因此我们引入技术磁化饱和的概念。在技术磁化过程中，当外磁化场变化 50%时，B_r 的变化小于 1%，则认为样品已达到技术磁饱和状态。

1.8　磁特性参量的温度系数

剩磁温度系数：由于温度变化而引起剩磁的相对变化与温度变化之比，即：

$$a_{M_r}=(dM_r/dT)M_r \tag{2.6-5}$$

磁极化强度矫顽力的温度系数：由于温度变化而引起磁极化强度矫顽力的相对变化与温度变化之比，即：

$$a_{H_{cJ}}=(dH_{cJ}/dT)H_{cJ} \tag{2.6-6}$$

a_{M_r} 与 $a_{H_{cJ}}$ 单位均为：$\%℃^{-1}$。

2　闭磁路测量

闭磁路测量是硬磁体磁性能基本的测量方法。无论是实验室计量或工业测量，这种方法都占据主导地位。之所以如此，是因为闭路方法是准静态测量，且没有自退磁场的影响，没有因此带来的修正等不确定因素，因而能够较易实现高的测量准确度和量值溯源。只要被测样品的尺寸和形状及所需磁化场符合要求，测试者就可以完全相信闭路测试结果的准确性，良好的复现性也可以预期。另一方面，IEC、ASTM 等国际标准都已对闭磁路硬磁测试方法作了详细的规定，包括磁场发生装置、测试系统、测试条件等都有明确的规定。这样将有利于在国际范围内硬磁体性能的比较和传递。GB 3217—1992 同样详细规定了闭磁路的测试方法，闭磁路是硬磁材料磁特性的绝对测试方法，不仅可以溯源至国际基准单位，而且具有不可替代的法律效力。

闭路测量方法在国家标准 GB 321F—1992 以及 IEC404-5 中作了详细规定。测量过程中，针对不同材料、不同测量参数及需要，应采用不同的测量手段。通常我们可以实现以下测量：

(1) 一般磁滞回线测量：对各向同性、各向异性如 AlNiCo、铁氧体等磁体的测量。

(2) 退磁曲线测量：对高矫顽力磁体，如烧结、粘结 NdFeB、钐钴磁体的测量。

(3) 磁体高温特性测量。

2.1　闭磁路测量基本设备

2.1.1　电磁铁

2.1.1.1　电磁铁产生强磁场的原理

如图 2.6-1 所示，在一个有开口的软磁环上均匀绕有 N 匝磁化线圈，流过的电流为 I。设开口宽度 L_a、铁心的有效磁路长度为 L_m，根据安培环路定律有

$$\oint H\cdot d_l=NI \tag{2.6-7}$$

式中：NI 是磁路中的磁动势，它与电路里的电动势等价。利用磁路中的欧姆定律：

$$\Phi=\frac{NI}{R_m} \tag{2.6-8}$$

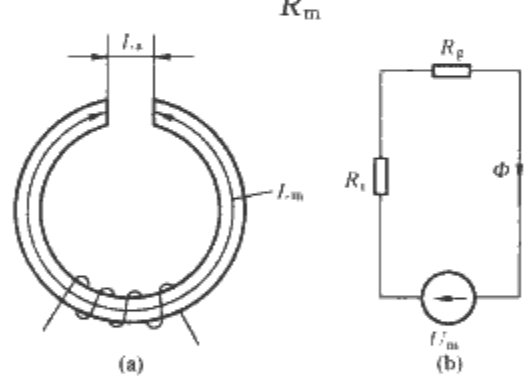


图 2.6-1　有气隙磁路及其等效磁路

(a) 有气隙磁路；(b) 等效磁路

其中，磁阻由两部分组成，铁心的磁阻和气隙的磁阻：

$$R_m=\frac{L_m}{\mu S}+\frac{L_a}{\mu_0 S} \tag{2.6-9}$$

式中：μ 为铁心的磁导率；μ_0 为气隙的磁导率．当 $\mu\gg\mu_0$ 时：

$$R_m=\frac{L_a}{\mu_0 S} \tag{2.6-10}$$

可得：

$$\Phi=\frac{NI\mu_0 S}{L_a} \tag{2.6-11}$$

而气隙处的磁场强度为：

$$H=\frac{\Phi}{\mu_0 S}=\frac{NI}{L_a} \tag{2.6-12}$$

如果没有铁心，根据安培环路定律可计算出：

$$H_0=\frac{NI}{L}\approx\frac{NI}{L_m} \tag{2.6-13}$$

比较 H 和 H_0 可知，当线圈内放有铁心后，铁心开口处的磁场强度增加了 L_m/L_a 倍。也就是说它将螺绕环的有

效磁路大大缩短，电磁铁产生强磁场的原理就在于此。

电磁铁通常由极头、磁轭及励磁线圈组成。国标规定极头和磁轭由矫顽力不大于 100A/m 的软磁材料制成。其结构对称。但在实际应用中为了产生较强的外磁化场也采用矫顽力大于 100A/m 的材料例如铁钴材料制作成极头。从磁路构成的角度来讲，电磁铁的几何形状和使用材料的磁导率值是最重要的因素。对材料矫顽力的规定，主要为了方便冲击法的测量。在励磁电流为零时，极头间的残留磁场强度 H_r 与极头材料矫顽力 H_c 之间的关系是：

$$H_r = \frac{H_c L_m}{L_a} \tag{2.6-14}$$

式中：L_m 为电磁铁有效磁路长度；L_a 为两极头间的距离。

例如：当 $H_c = 100\text{A/m}$、$L_m = 1\text{m}$、$L_a = 0.01\text{m}$ 时，$H_r = 10\text{kA/m}$。但在使用霍尔原件做磁场传感器和扫描法测量的今天，要求极头材料一定小于 100A/m 显得有些苛刻。

除了用软磁材料构成磁路外，进一步提高电磁铁磁场强度的方法有：提高材料的饱和磁化强度值、加大磁轭直径与极头直径的比以及增加最大安匝数。

极头材料通常由纯铁和含钴 30%～50%的铁钴材料制成。它们的饱和磁极化强度分别为 2.15T 和 2.45T。后者是目前适合于制作极头并具有最高饱和磁化强度值的材料。它比纯铁极头所能产生磁场强度的能力高 14%左右。

电磁铁产生的磁场强度 H 还与磁轭直径 D 与极头直径 d 比的对数成正比：

$$H \propto \ln\left(\frac{D}{d}\right) \tag{2.6-15}$$

比如一个 $D = d = 10\text{cm}$ 的电磁铁在 1cm 间隙内产生 1.2T 的场强的话，在其他条件不变的情况下将 d 改为 6cm 时可产生约为 2T 的场强。

安匝数是电磁铁构成的磁路的磁动势，是产生磁场强度的源。在极头趋于饱和时，磁场强度与电流成正比。因此，减少励磁绕组电阻提高励磁电流是产生强磁场最有效的方法。

2.1.1.2 电磁铁与样品构成闭合磁路的原理

如在一个磁导率很高的磁性物质平面附近有一磁矩 m，该磁矩在空间产生的场为 m 和 m' 单独存在时产生的磁场之和。其中 m' 是平面对称处等效存在于磁性材料内部的小磁矩，称为 m 的像。这一现象称为镜像效应，用 μ 表示相对磁导率，则：

$$m' = m\frac{\mu - 1}{\mu + 2} \tag{2.6-16}$$

当 $\mu \gg 1$ 时，$m' = m$。

如果小磁矩在两个磁性物质平面之间时，在两个磁性物质中会等效产生无穷多个像。当小磁矩的两端面与两磁性物质界面紧密接触时，磁矩与它的像将连接在一起。

电磁铁的极头具有较高的磁导率，当它的端面积远远大于样品的截面积时，就等效于上面提到的情况。理想情况下，试样放入电磁铁后，它的长度等效变为无限长，因此退磁因子减为零。这就是电磁铁与样品构成闭合磁路的基本原理。也就是说，构成闭磁路要有两个条件同时成立。即：极头和磁轭具有较高的磁导率，样品端面与极头端面紧密接触。为了在技术上保证样品与极头的接触。国标规定试样与极头端面的光洁度不低于 6。

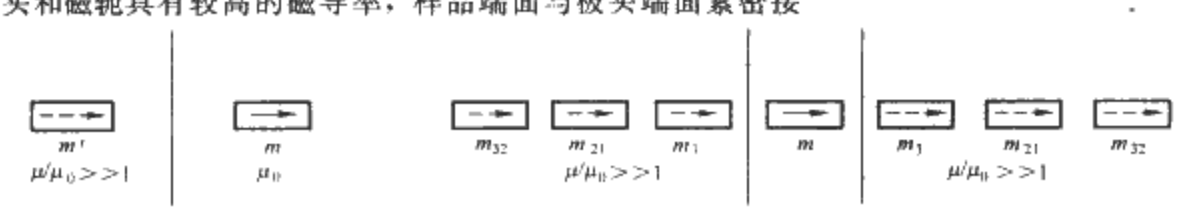


图 2.6-2 镜像效应示意图

2.1.2 电子积分器

电子积分器是一种高灵敏度的积分器，它具有低漂移、高输入阻抗、宽频带的性能，广泛应用于磁性能测量中。电子积分器测量原理如图 2.6-3 所示：n 为探测线圈；Φ 为链过线圈的磁通；R=积分电阻；C 为积分电容；E_s 探测线圈两端的感应电动势；E_c 为电容两端电压；I 为积分器回路电流；E_0 为积分器输出电压。

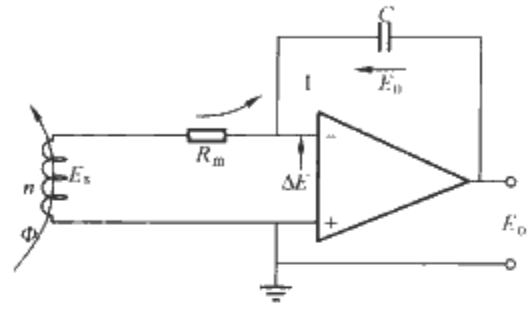


图 2.6-3 电子积分器工作原理图

根据法拉第电磁感应定律，当线圈内磁通发生变化后，线圈两端产生一个感应电动势：

$$E_s = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{2.6-17}$$

因 E_s 产生的电流为：

$$I = \frac{E_s}{R} \tag{2.6-18}$$

该电流全部对电容充电，电容两端的电压为：

$$E_c = -\frac{Q}{C} = \int \frac{I}{C}dt = \int \frac{1}{RC}E_s dt$$

$$= -\int \frac{1}{RC}\left(\frac{d\Phi}{dt}\right)dt = -\frac{\Phi}{RC} \tag{2.6-19}$$

而积分器输出端的电压：

$$E_0 = E_c + \Delta E \tag{2.6-20}$$

当放大器增益和输入阻抗足够大时，ΔE 可忽略不计，有：

$$E_0 = E_c = -\frac{\Phi}{RC} \tag{2.6-21}$$

由上式可知，积分器的输出与链过探测线圈的磁通成正比，比例系数为 $1/RC$，这就是电子积分器测量磁通的原理。如果当探测线圈的电阻不可忽略时，要对积分器的积分常数做修正，设探测线圈电阻为 r，修正系数为：

$$k = 1 - \frac{r}{R} \tag{2.6-22}$$

积分常数 $1/RC$ 决定了积分器的灵敏度。

从前述可以看出，输出电压 E_0（或磁通量）是输入电压对时间的积分。当探测线圈中没有磁通量变化时，理论上探测线圈两端感应电压为 0，即，$E_s = 0$，此时积分放大器输出 E_0 应为 0，但实际上即使探测线圈短路，由于积分器放大器不可能绝对调平衡，在放大器输入端也总是有输入信号，尽管很小，但永远不可能一直为 0，这种现象我们称为“零点漂移”。

零点漂移是电子积分器不可避免的，也是它的最大缺点，因此在磁测量中应引起足够的重视。

在测量过程中，“零点漂移”可容许的大小取决于被测信号的大小以及测量结果的精度。例如：要求磁通量 Φ 测量准确度为 10^{-2}，磁通变化为 10^{-3}Wb，测量时间 10s，则“零点漂移”电压信号的平均值应小于：

$$U_d \approx 0.01 \frac{\Phi}{t} = 10^{-6}\text{V} \qquad (2.6\text{-}23)$$

在磁通测量过程中，由于线圈连接不当而产生的“热电动势”也会导致“零点漂移”，例如线圈接头采用不同技术等这一点必须引起重视，因此最好将测量线圈直接与积分放大器输入端连接，或者采用低热电动势的连接头。另外，使用电子积分器之前，最好预热 10～30min，综上所述，电子积分器的测量准确度主要取决于“漂移”大小，因此通过采用高性能的积分放大电路以及非常准确的数字电压表（或高精度的数模转换器），其积分误差可控制在非常小的范围内。

对于一个“零点漂移”为 10^{-5}Vs/min 的电子积分器，当测量线圈匝数为 100，被测磁通为 10^{-4}Vs，一分钟后其磁通测量值优于 0.1%。

2.1.3　霍尔磁强计

霍尔磁强计，也称为“特斯拉计”或“高斯计”，通常用来测量磁体表面或磁体气隙磁场以及磁通密度。其测量值可以以单位“T“或“Gs”表示。在空气中，磁通密度与磁场的关系为：$B=\mu_0 H$。

2.1.3.1　霍尔磁强计测量原理

霍尔磁强计基于霍尔效应，其传感器也叫霍尔元件，是由半导体材料制成的，比较好的有砷化铟（InAs）。图 2.6-4 为霍尔法测量磁场的示意图。将霍尔元件放入磁场中，并使其表面与磁场垂直。当有电流 I 通过它时，运动的带电粒子将受到力的作用（即洛伦兹力）：

$$\boldsymbol{F} = q \cdot (\boldsymbol{V} \times \boldsymbol{B}) \qquad (2.6\text{-}24)$$

式中：$\boldsymbol{V}$ 为带电粒子运动的速度；$\boldsymbol{B}$ 为磁场的磁通密度；q 为带电粒子的电荷。

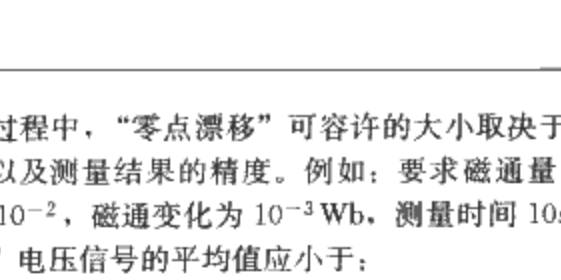


图 2.6-4　霍尔法测量磁场的示意图

霍尔元件中运动的带电粒子（如由 $C \rightarrow D$ 方向）由于受到洛伦兹力作用将向它的表面偏转，结果在霍尔元件两表面聚集了不同符号的带电粒子，因而在两表面产生电位差。

$$U_H = K_H \frac{IB}{d} \qquad (2.6\text{-}25)$$

实验证明，在磁场不太强时，霍尔电压与密度 B 近似成正比。式中 d 为霍尔片厚度，K_H 称作霍尔系数，它与霍尔元件的材料，使用温度以及 B 的大小有关。当 B 不太强时，K_H 近似为常量。一般来说，通过适当的电路设计，霍尔磁强计的非线性误差可优于±1%，当然通过微处理器的修正，磁测量范围可扩展到 30T。

对于特别低的磁场测量，需要特殊的探头。这种探头具有使磁通聚集到霍尔元件上并且提高其灵敏度的功能，例如用于地磁场测量或航空运输货物磁性的检查等。

霍尔探头分为横向测量头和轴向测量头两种。霍尔磁强计常常用于磁体表面场的测量。在精确测量场合，要求霍尔片所处位置磁场是均匀的。尽管霍尔片的面积很小（典型为 0.1～0.8mm²）；但是霍尔片测量磁体表面场，其表面场均匀性仍不够，常常仅测出最大磁场值，当用不同霍尔磁强计测量表面场时，其可比性比较差。比较好的办法是采用具有峰值保持的霍尔磁强计，当然还必须考虑到霍尔片表面与磁体表面的距离。

2.1.3.2　测量误差分析

霍尔磁强计主要用于磁场测量，其测量原理基于霍尔效应，即磁场正比于霍尔感应电压。我们应用式（2.6-25）时，一般认为 K_H 为常数，但这只是在一定范围内的近似，霍尔磁强计的测量误差主要取决于 K_H，影响 K_H 的因素一般有以下几个方面。

（1）半导体材料。不同半导体材料及纯度，对 K_H 的影响不同。通常霍尔片元件采用砷化镓、砷化镉等。

（2）温度。温度对 K_H 影响很大，因为不同温度下半导体内带电粒子的运动状态不同。

（3）磁场范围。K_H 在不同磁场范围，其值是不同的，即对磁场表现出非线性。

在精密测量中，应采用微处理器先将此非线性曲线存储下来，对实际测量值进行修正。

2.2　闭磁路测量方法

2.2.1　磁场测量

2.2.1.1　用霍尔磁强计测量

在测量过程中，应保持霍尔片的校准平面尽量与磁化场垂直，霍尔片应放置到样品中央部位并且尽量靠近样品。霍尔磁强计在霍尔片放置之前应先调零，此种方法一般用于 AlNiCo，铁氧体等低矫顽力磁体测量。

2.2.1.2　用 H 线圈测量

用空心探测线圈和积分器也可以测量磁场强度。由于积分器直接测量到的是磁场强度的改变量，因此确定磁场零点和积分器零点非常重要。在确定零点以后，积分器的输出与磁场强度成正比。

$$H = \frac{\Phi}{NS} = RC \frac{U}{NS} \qquad (2.6\text{-}26)$$

式中：U 为积分器的输出信号；NS 为探测线圈常数；RC 为积分器常数。

磁场探测线圈有两种设计方法分别如图 2.6-5（a）、2.6-5（b）所示。图 2.6-5（a）中，H 线圈截面积设计的相对较小，紧贴磁体放置。当磁化场不太高并且 H 线圈所处位置磁场均匀时，H 线圈测量的磁场能够真实地反映磁化场，否则仅测出 H 线圈所在位置的磁场。

图 2.6-5（b）中，H 线圈由两个同心，匝数相同但面积不相同，串联反接的线圈组成。当两极头之间有磁化场时，两线圈对磁体的感应电压相同，但由于串联反接，两信号相互抵消，其净电压仅反映两线圈之间磁通的变化量。因此，只要知道两线圈之间的有效匝面积，即可测出磁场 H。

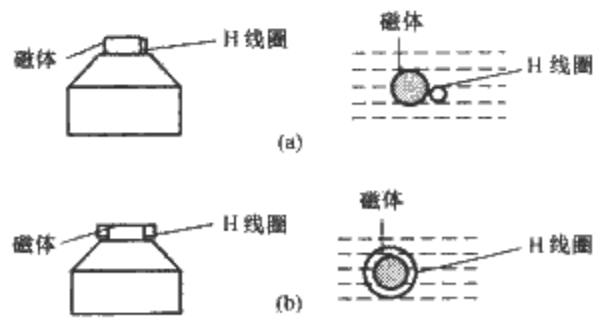


图 2.6-5　H 线圈的结构及与磁体的相对位置示意图

（a）H 线圈紧贴磁体放置；（b）由两个同心、匝数相同但面积不相同、串联反接的线圈组成的 H 线圈

这种结构的 H 线圈一般是测量磁体附近磁场的平均值。在磁滞回线测量中，图 2.6-5（b）中的 H 线圈比图 2.6-5（a）更有益。

图 2.6-5（a）和图 2.6-5（b）中显示的 H 线圈一般用于稀土永磁特别是矫顽力较高的磁体测量，如：NdFeB，SmCo 等。当然也适用一般永磁体测量。

2.2.2 磁通密度 B 测量

磁通密度 B 测量一般采用 B 线圈。B 线圈有两种设计：

（1）用很细的导线直接绕在样品上，此时线圈面积与样品截面积相同，线经面积忽略不计，则有：

$$B = \frac{\Phi}{NA_s} \tag{2.6-27}$$

式中：N 为线圈匝数；A_s 为样品面积。

此种线圈一般用于 AlNiCo、铁氧体等低矫顽力磁体的测量。

（2）将导线绕在一固定磁线圈骨架上，在使用之前必须对线圈面积校准，则有：

$$B = \frac{\Phi - \mu_0(A_c - A_s)H}{A_s} \tag{2.6-28}$$

式中：A_c、A_s 分别为线圈面积和样品面积；Φ 为线圈测量磁通；H 表示磁场强度。

2.2.3 磁极化强度 J 测量

磁极化强度 J 与 B、H 的关系为：

$$J = B - \mu_0 H \tag{2.6-29}$$

由上式可看出，J 的测量只要将样品内外磁化场 H 抵消掉即可。J 线圈的设计通常有两种形式。

图 2.6-6（a）所示为同心 J 线圈，它由两个同心、具有相同匝面积且串联反接的线圈组成，即：

$$N_1A_1 = N_2A_2 \tag{2.6-30}$$

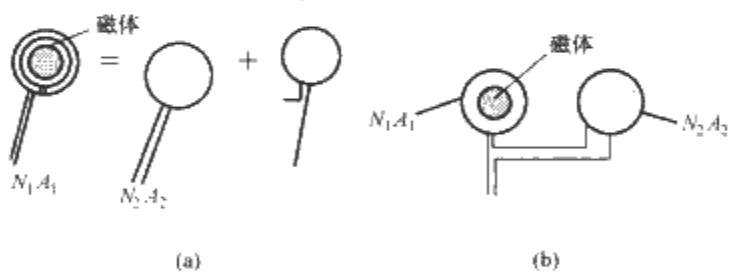


图 2.6-6 J 线圈结构示意图

（a）同心 J 线圈；（b）并行 J 线圈

当线圈内没有磁体，施加外磁场时，线圈两端测出的信号为 0。

$$\Phi = \mu_0 H(N_1A_1 - N_2A_2) = 0 \tag{2.6-31}$$

即 J 线圈对外磁场不起作用。当磁体放入线圈内，线圈两端测出信号为：

$$\begin{aligned}\Phi =& [BN_1A_s + \mu_0 HN_1(A_1 - A_s)] - \\ & [BN_2A_s + \mu_0 HN_2(A_2 - A_s)] \\ =& (N_1 - N_2)A_s(B - \mu_0 H) + \\ & \mu_0 H(N_1A_1 - N_2A_2)\end{aligned} \tag{2.6-32}$$

因为 $\mu_0 H(N_1A_1 - N_2A_2) = 0$

所以 $\Phi = (N_1 - N_2)A_s(B - \mu_0 H)$

则有 $\Phi = (N_1 - N_2)A_sJ$ (2.6-33)

所以说，所谓 J 线圈就是由两个同心，匝面积相同但反接的线圈组成。J 线圈在永磁测量中很实用，特别是对高矫顽力永磁体，如 NdFeB、SmCo 等。但是必须注意：由式（2.6-33）可看出，采用 J 线圈测量磁体，实际上是测量磁体的平均性能。另外从 J 线圈原理可看出，要求外磁化场 H 在整个 J 线圈范围内均匀，否则式（2.6-33）不成立。通常要求磁体的直径至少大于 J 线圈直径的 2/3，从而保证测量误差小于 1%。

图 2.6-6（b）中为另一种 J 补偿线圈，它由两个并行排列、匝面积相同且串联反接线圈组成。测量磁体时，将磁体放入一个线圈内，与图 2.6-6（a）中分析相同，由于 $N_1A_1 = N_2A_2$，则线圈对 H 信号不起作用，仅对 J 信号起作用。如果磁体放入线圈 1 中，则有：

$$\Phi = N_1A_sJ \tag{2.6-34}$$

这种结构的 J 线圈与图 2.6-6（a）中相比，优点是比较容易制作，但由于其补偿线圈离样品较远，如果磁化场不是很均匀，会产生比较大的误差，所以实际测量中不常用。

对于磁感应强度 B 和 J 的测量，两者之间只要测出一个，另一个即可计算出，至于在实际使用过程中，选择 B 线圈还是 J 线圈，取决于所测量样品以及方便程度。

2.2.4 磁滞回线测量

测量磁滞回线、退磁曲线的基本原理如图 2.6-7 所示。

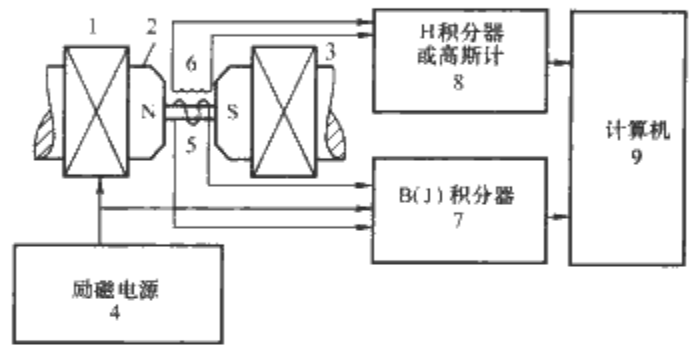


图 2.6-7 闭路硬磁体磁滞回线、退磁曲线的基本测量原理

1—电磁铁；2—极头；3—样品；4—励磁电源；5—B 或 J 线圈；6—H 线圈或霍尔片；7—B 或 J 积分器；8—H 积分器或高斯计；9—计算机

图 2.6-7 中，被测样品放在可移动的电磁铁两极头之间，并且完全闭合（确保无气隙），励磁电源输出电流，磁化线圈将样品磁化，磁化场由 H 线圈或霍尔片通过 H 积分器或高斯计测量，样品磁通由 B 或 J 线圈通过 B 或 J 积分器测量，计算机负责控制电源输出、信号采集并给出磁滞回线。根据被测样品等条件的不同，所采用的磁通测试线圈和磁场感应器会有所不同，下面给出常用的测量步骤：

（1）霍尔探头（或 H 线圈）和 B（或 J）探测线圈分别连接到霍尔磁强计（或 H 积分器）和 B 积分器上，调整测量仪表到工作的稳定态。

（2）样品套上磁通测量线圈后放入电磁铁极头内，调整极间距离使极头端面与样品端面紧密接触。磁通探测线圈应放在样品的中心附近处，霍尔探头（或 H 线圈）的放置位置在极头两端面的对称处并同时保证位于磁场均匀区内。霍尔片的法方向（或 H 线圈的轴向）与外磁化场方向平行。

（3）以 H_m 为 3~5 倍内禀矫顽力的磁化场将样品反复磁化两次以上。

（4）按 I_m、0、$-I_m$、0、I_m 的顺序改变励磁电流，由计算机得出 $B-H$ 或 $J-H$ 回线或退磁曲线。

采用前述扫描法测量永磁材料准静态下的磁滞回线时，励磁电源发出的励磁波形近似于三角波，扫描周期约为 1min。在磁通变化较陡的区域，要求控制磁化场强度的变化速率尽可能慢，以减少磁后滞对测量带来的影响。

关于磁通探测器的选择，GB 3217—1992 规定，内禀矫顽力 H_{cJ} 小于 600kA/m 的磁体，使用 B 线圈；内禀矫顽力 H_{cJ} 大于 600kA/m 的磁体使用 J 线圈测量。磁场探测器没有

特殊规定，但通常内禀矫顽力 H_{cJ} 大于 600kA/m 的磁体使用 H 线圈测量磁场强度。表 2.6-1 给出了各种探测器适用于测量的磁体以及对测量精密度的影响，以供参考。

表 2.6-1　各种探测器所适用的磁体以及测量精密度主要影响因素

	测量精密度影响因素	适用测量磁体
B 线圈	取决于样品均匀性，样品形状以及外磁场均匀性	AlNiCo，铁氧体
J 线圈	取决于样品均匀性，样品形状以及外磁场均匀性	AlNiCo，铁氧体，NdFeB
霍尔片	温度、磁场范围	AlNiCo，铁氧体
H 线圈	温度、磁场范围	NdFeB，SmCo

2.2.5　测量注意事项

2.2.5.1　试样

通常人们总希望直接测量产品或器件的磁性能，但在很多情况下为了保证 B_r、H_c、$(BH)_{max}$、μ_{rec} 等磁参数测量的精度以及考虑到磁化装置的磁化能力，必须对试样的几何形状、尺寸、加工工艺和样品内部磁性能的分布等做出具体规定：

（1）样品的内部组织结构和密度分布一致。

（2）样品内部磁性能分布一致且取向方向与测量磁化方向一致。

（3）规定的几何形状易于机加工，截面积在磁化方向保持一致且可以高精度测量。

（4）几何形状应保证 B 磁通探测线圈可以密绕在样品上。

综上所述，理想的测试样品的几何形状是圆柱体和矩形立方体。在国标 GB 3217—1992 中，对试样的尺寸做了以下规定：

（1）试样两端面应磨削到互相平行，平行度不超过公差等级 9 级。端面垂直于轴线垂直度不超过公差等级 9 级。光洁度不低于 6，以减小气隙。

（2）试样尺寸的测量误差不得超过 0.2%。

（3）为保证样品在磁场的 1%的均匀区内，试样的几何尺寸的大小与电磁铁极头间的关系为：$D>d+1.2L$、$D>2L$，式中，D 为极面直径，d 为极面均匀区尺寸，试样的长度 L 要大于 8mm。

样品加工和测量精度对测量的直接影响有以下两点：

首先，截面积对磁通密度计算有影响。例如样品截面为圆形时，设直径测量误差 $\delta=0.2\%$。

因为

$$B=\frac{\Phi}{S}=\frac{\Phi}{\frac{\pi D^2}{4}} \tag{2.6-35}$$

所以

$$B'=\frac{4\Phi}{\pi D^2\ (1+\delta)^2}B(1-2\delta) \tag{2.6-36}$$

磁通密度的测量误差是直径测量误差的 2 倍。

其次，气隙对磁场测量会有影响：因气隙产生的测量磁场强度的最大相对误差可按下式估计：

$$\frac{\Delta H}{H}=-2\delta\frac{B}{\mu_0 LH} \tag{2.6-37}$$

式中：B、H 分别为退磁曲线上给定点的磁通密度和磁场强度；L 为试样长度；δ 为试样和极头表面间的气隙。

2.2.5.2　环境温度

永磁材料的磁特性和退磁曲线随温度的变化而变化，在测量过程中要求样品整体温度一致，外部环境温度无明显变化。通常如以 20℃为基准，保证测量精度在 1%范围内的允许温度变化是：AlNiCo 材料为 20℃±15℃；铁氧体材料 20℃±3℃，NdFeB 材料 20℃±1℃。

2.2.5.3　测量时所需的最小饱和磁化场强度

永磁材料的最低饱和磁场强度值按照 IEC 的规定为被测样品内禀矫顽力的 3～5 倍。

对 AlNiCo-5 和无取向铁氧体的试验表明：AlNiCo-5 的最低饱和磁场强度为 H_{cJ} 的 3 倍，无取向铁氧体的最低饱和磁场强度是该材料 H_{cJ} 的 4.6 倍。一般来说取向好的材料所需饱和场强度较低有 3 倍 H_{cJ} 即可，无取向材料所需的饱和磁化场强度较高，有时在 5 倍 H_{cJ} 以上。

2.2.5.4　磁场传感器的放置位置

由于样品具有较高的剩磁，在样品的端面附近磁场均匀性受到干扰。在样品轴向的中心，距样品表面 10mm 处的地方，外磁化场的均匀性基本上没有受到干扰。因此在测量退磁曲线时磁场测量线圈的位置以试样轴向的中心附近距试样表面 10mm 处较为合适。

2.3　稀土永磁材料的测量特点

2.3.1　稀土永磁材料的饱和磁化

2.3.1.1　磁化机制

近代开发出的高性能永磁材料，例如铈钴铜铁、SmCo、以及 NdFeB 等材料的制作工艺均采用粉末烧结的方法。用这一方法提高材料内禀矫顽力的基本指导思想是单畴粒子理论。但是人们发现，对于同样的制作工艺 $SmCo_5$ 系材料与 Sm_2Co_{17} 材料的磁化特性明显不同，见图 2.6-8。

$SmCo_5$ 的磁化特性表现为：

（1）初始磁化曲线近似于软磁材料那样，磁化强度随外磁化场变化上升很快，用比矫顽力弱得多的外磁化场即可将其磁化到饱和。

（2）在饱和磁化后，反向对其磁化时它表现出很强的矫顽力值。

（3）如果初始磁化不到饱和，对其反向磁化时，则矫顽力值较弱。

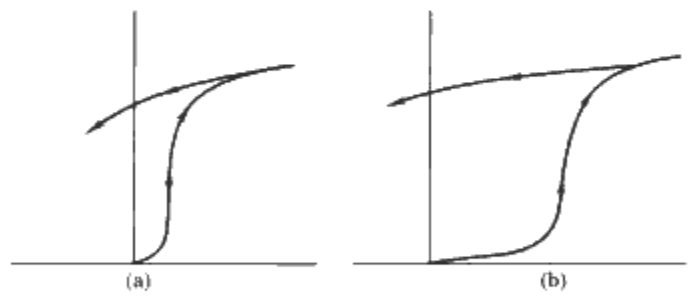


图 2.6-8　稀土永磁材料起始磁化曲线示意图
（a）$SmCo_5$；（b）Sm_2Co_{17}

而 Sm_2Co_{17} 材料则表现为：

（1）初始磁化曲线上升很慢，当外磁化场强度达到某一临界值时，磁化强度急剧上升并达到饱和。

（2）在饱和磁化后，改变磁化方向，磁化强度可以维持到内禀矫顽力附近才锐减到零。

（3）在没有饱和磁化的情况下将磁场反向，磁化强度也将维持到内禀矫顽力附近，然后才出现磁化的急剧变化。这时的矫顽力值与饱和情况下的值基本一致。

以上两种磁化过程是用单畴粒子磁化过程所不能解释的。进一步的研究发现烧结后的 SmCo 材料其微粒的几何尺寸约在 5～20μm 之间，比出现单畴的临界理论值高出一个

数量级。

实验证明，在这些粒子中存在有畴结构。因此仅用单畴粒子模型是不可能解释这种材料的磁化过程。为了对上述磁化现象做出解释，世界上有很多研究人员做了大量的工作，先后提出了不少模型和假说以解释这类材料的磁化机构和矫顽力生成机构。目前最有说服力的解释是“核模型”和“阻塞模型”，用这两种模型可以对上述两种磁化过程做出解释。

“核模型”认为，由于在 $SmCo_5$ 材料的粒子内部存有磁畴，在加有较弱的外磁化场时，对磁化的主要贡献是畴壁的移动，这种畴壁的移动在初始磁化阶段比较容易。当磁化接近饱和时，畴壁移到粒子的几何边界处并被固定在那里。这种畴壁的移动是不可逆的，在反向磁化时，当磁化场增加到某一值时，在粒子内部出现与原磁化方向相反的核，此时的磁场强度值称为“核生成临界场”。随着反向磁化场的增加，反磁化核不断长大。当外磁化场增加到矫顽力值附近时，这些核很快变大直到粒子内部磁化的方向全部转到外磁场方向来。由于反向磁化核多产生于粒子内部或表面结晶的缺陷处，因此在这种磁化机制中，结晶的缺陷使矫顽力值大大下降。如果粒子的结晶在表面和内部没有任何缺陷，则不会有反转磁化核的生成，要将这种类型的材料反向磁化到饱和会变得非常困难。核生成临界场强度的大小决定了该材料矫顽力的大小。当然，如果没有将材料磁化到饱和，在粒子内部将还有畴壁的存在，此时不需产生反转磁化核，畴壁的移动即可较容易地将磁体反向磁化。因此，在这种情况下，它表现出较弱的矫顽力值。

对 Sm_2Co_{17} 材料磁化过程的解释，“阻塞模型”认为：

粒子内部也有磁畴存在，这些磁畴的畴壁被粒子内部的结晶缺陷所阻尼而不能自由移动。因为存在有这样的阻尼，在初始磁化的开始阶段，磁化不明显增加。当外磁化场强度增加到足以克服阻尼使畴壁移动时，磁化才发生激增。因此它的初始磁化曲线表现为，开始阶段基本不随外磁化场变化，当接近矫顽力值时，磁化陡然上升。在反向磁化时，不管样品是否被饱和磁化，因阻尼的存在，畴壁始终移动困难，磁化将维持到矫顽力附近。当外加磁化场大于矫顽力值时，阻尼被克服，磁化方向反转并趋于饱和。

“核模型”和“阻塞模型”较好地解释了两种不同的典型磁化过程，一般可以认为：稀土永磁材料的磁化过程是两种磁化机制的复合体。实验表明 $SmCo_5$ 材料和低内禀矫顽力 NdFeB 材料的磁化机构更接近“核模型”，而高内禀矫顽力 NdFeB 材料的磁化机构则更接近“阻塞模型”。虽然稀土永磁存在两种磁化机构，但在对他们进行饱和充磁和测量过程中，则表现出以下共同特点：

（1）在退磁状态由于有磁畴的存在，对稀土永磁材料充磁所需的磁场强度一般为矫顽力的 1～2 倍，既在退磁状态充磁较容易。

（2）当材料被饱和磁化后，由于磁畴的消失或阻尼的存在，反向充磁到饱和变得非常困难。此时的充磁磁场强度一般为内禀矫顽力的 3～5 倍。对于内禀矫顽力低剩磁高的材料，2 倍 H_{cJ} 的磁化场也可能得到对称的饱和磁滞回线。

（3）在饱和磁化后，只要材料所经历的反向磁化场不大于 B 矫顽力，在饱和充磁方向加 1 倍 H_{cJ} 左右的正向磁化场仍可将材料磁化到饱和并得到较好的测量重复性。即稀土材料的磁化一般在磁滞回线的一二象限有较好的回复特性。

对稀土材料的充磁与测量就是利用以上三个基本特点进行的。例如对有磁化历史的样品，总希望退磁然后再进行饱和充磁。测量前总要加一正向磁化场使样品恢复到饱和磁化态。

2.3.1.2 饱和充磁

在已知稀土永磁的磁化特性后，可以利用这些特性对其充磁。普通实验室中一般都装备有脉冲磁场装置，它所能提供的最大磁场强度在 6～10 个特斯拉。原则上讲它可以将具有 2400kA/m 内禀矫顽力的材料在退磁状态下充磁到饱和，但在使用脉冲磁场时由于会产生以下效应使磁场的有效值减弱，因此必须引起我们的注意：

（1）退磁效应。对于圆柱形样品，它的退磁场在样品内部分布是不均匀的，在其端面附近退磁因子近似为 1/2。假定被磁化样品具有 1.4T 的饱和磁极化强度值，则退磁场强度约为 560kA/m（0.7T），在开磁路条件下充磁时这一影响是不可忽视的。

（2）涡流效应。SmCo 系或 NdFeB 永磁材料都是金属导体，在使用脉冲磁化时，因涡流效应产生的附加磁场会严重减弱外磁化场强度。设 H_{in} 为样品内部的磁场强度，则有：

$$H_{in} = H_{ex}e^{\frac{r}{d}} \tag{2.6-38}$$

式中：H_{ex} 为外磁化场强度；d 为趋肤深度；r 为样品内某一点距表面处的距离。

式（2.6-38）表明 H_{in} 将随 r 指数衰减，当 $r=d$ 时，H_{in} 只有 H_{ex} 的 30%左右。

趋肤深度的计算公式为：

$$d = 503\sqrt{\frac{\rho}{\mu_f}} \tag{2.6-39}$$

取 $\rho = 5\times10^{-7}\ \Omega\cdot m$；$\mu=1$；$f=50Hz$；则：$d=0.05m$。对于直经为 0.01m 的圆柱样品，将 $d=0.05m$ 带入式（2.6-38）计算得，其轴线附近的磁场强度减弱到 90%左右。涡流效应的影响对大块样品更为显著。

（3）磁后滞效应。从磁化机制的角度来说，技术磁化过程是畴壁移动和磁矩转向的过程。但不论是位移还是转向都要在一定的时间内进行。当采用脉冲磁场充磁时，我们不仅需要脉冲场有较高的峰值，还要求它必须具有一定的脉宽。考虑到磁化的作用时间，取这一时间内磁场的最小值为有效峰值 H'_m，则：

$$H'_m = H_m\sin(\omega\tau) \tag{2.6-40}$$

例如：取作用时间 τ 为 1ms，对于 50Hz 的脉冲场，该值约为峰值的 70%。由此可见，要使脉冲场和直流场等效，要求脉冲场有更高的峰值。仅用峰值是矫顽力的 3～5 倍来对充磁磁场强度进行估计是不够的，还需考虑到各种效应的影响。

2.3.1.3 正向磁化场

正向磁化场是在样品充磁方向上施加的外磁化场。在稀土材料测试中预先在充磁方向施加外磁化场是不可缺少的测量步骤。这是由于一般样品总是在开磁路下充磁，充磁后样品在自退磁场作用下，处于退磁曲线的某一点。

尽管稀土材料的回复磁导率接近于 1，但将样品放在电磁铁中使退磁场和外磁化场为零时，磁通密度 B 并不回到剩磁 B_r 处，它要略小于 B_r。例如对于退磁曲线矩形较好的 NdFeB 材料，它的回复磁导率约为 1.02，剩磁约为 1.2T，当退磁因子为 0.3 时，测量得到的 B'_r 比 B_r 小 0.3%～0.6%左右。

为了使磁通密度在 $H=0$ 时重新回到剩磁处，必须在充磁方向重新磁化样品。实验证明，对于不同材料的样品所需的正向磁化场强度是不一样的，并且与样品所经历的最大反向磁化场有关。用 H_{mp} 表示正向磁化场强度，B'_r 表示对应

不同的 H_{mp} 测得的剩余磁感应强度。作 B'_r 对 H_{mp} 的曲线，可以发现这一曲线也分为两种类型，分别与初始磁化特性相对应。也可以用“核模型”和“阻塞模型”进行解释。对于核模型磁化机构的材料，当反向磁化场在 H_{cB} 附近时，为了得到重复的测量结果，一般只要施加 1 倍 H_{cJ} 的正向磁化场就可将样品重新磁化到饱和。而对于阻塞模型磁化机构的材料，当反向磁化场到达 H_{cB} 附近后，则需大于 1 倍 H_{cJ} 的正向磁化场才能使样品重新磁化到饱和。电磁铁的磁化能力一般在极间距离为 1cm 时可产生 1600～2000kA/m 的磁场强度，为了保证测量的重复性，在加正向磁化场时，应尽励磁电源和电磁铁的最大可能，使磁场强度达到 1600kA/m 以上。

样品从退磁状态、饱和充磁、自退磁、正向磁化直至回复到剩磁状态的整个过程对应于图 2.6-9 曲线中的 O、A、B_r、B'、B'_r、A'、B_r。

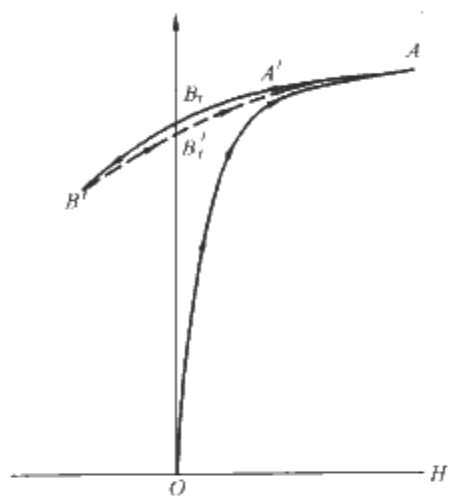


图 2.6-9　稀土永磁的磁化

2.3.2　大块稀土永磁样品测量问题

稀土永磁材料大块样品的测试是生产厂家和使用单位亟待解决的问题。这主要是由于稀土永磁材料目前造价仍然很高，而产品的体积越来越大，特别是 NdFeB 材料的产品有的一块重达半公斤。用取样的方法进行测量将对产品造成极大的浪费，同时使用单位有时也要求对每块产品都要进行测量，对外出口更是如此。

大块样品测量的主要问题是：

（1）充磁设备。由于样品体积大，要在较大的空间内产生强磁场需要很高的能量。在采用电容放电的情况下，对所需充电电容大小的估计可按下式计算：

$$C\frac{U^2}{2} = V\mu_0\frac{H^2}{2} \tag{2.6-41}$$

或

$$C = V\mu_0\left(\frac{H}{U}\right)^2 \tag{2.6-42}$$

式中：取电容充电电压 $U=1000$V、磁场强度 $H=6$T（4800kA/m）、线圈体积 $V=130$cm^3。

则：$C=1.3\times10^{-4}\times4\times3.141\ 6\times10^{-7}\times\left(\frac{4800}{1000}\right)^2$

$=4$mF

这种充磁装置在我国的 NdFeB 材料和应用企业已较常见，但由于充磁机对电容的寿命等要求很高，其造价仍然较为昂贵。

（2）磁化装置。测量大样品对电磁铁提出更高的要求。大块钕铁硼样品的几何尺寸约为 5cm×5cm×2.5cm，按国标 GB 3217—1992 第 5.6 条对极头直径和样品尺寸及均匀区的要求为：极头直径至少为 $D=110$mm。

（3）磁化电源。提高电磁铁磁场强度的方法一是提高极头材料的饱和值，增加磁轭直径与极头表面直径的比，另外一个有效的方法是提高励磁电流。因此研制大功率磁化电源也是测量大块样品所亟需解决的问题之一。

在测量方法上，大块样品和小样品是一样的。为解决大块样品和高矫顽力材料的测量，中国计量科学研究院磁测室研制了大功率电源，以往常用于小样品测量的电源，其技术指标通常为 100V、20A，阻抗 5Ω 左右，功率 2kVA。现在更大功率的电源为 5kVA 和 10kVA，当电磁铁励磁线圈电阻小于 2Ω 时，分别可产生 50A 和 70A 的电流。这样的电源一般说来已可以满足目前稀土永磁材料测量的要求了。

2.4　高温测量及温度系数的确定

2.4.1　高温测量系统

硬磁材料具有明显的温度特性，磁性测量时应该严格控制测试温度。例如 Ba 和 Sr 铁氧体具有正的内禀矫顽力温度系数 $a_{H_{cJ}}$ 约 0.3%～0.5%/℃，负的剩余磁化强度温度系数 a_{M_r} 约−0.2%/℃；这一点在 NdFeB 硬磁材料中的表现得尤为可观，尤其是内禀矫顽力的温度系数约为 $-0.9\%℃^{-1}$～$-0.5\%℃^{-1}$，磁化强度温度系数大约−0.1/℃，因此在以往的硬磁测量规程中提到的——测量中允许室温波动范围±5℃或±3℃都可能引入较高的测量不确定度或者需要繁琐的误差修正。针对这一问题，新的国家硬磁体磁性能测量规程将对此做出修改，规定 NdFeB 硬磁材料的测试温度波动范围必须至少控制在±1.5℃。

鉴于硬磁体的温度特性，一方面常温测试需要严格控制、准确测量极头的温度；另一方面，为了获得材料在高温下服役的可靠性及温度系数，能够提高极头温度并在高温下对磁体进行测量是非常必要的。IEC 60404-5 中规定对此问题的解决办法是把整个或部分磁路浸在温控油浴中测量，这样做不仅设备造价昂贵，而且不便于日常测试和维护。IEC 61807 报告提出了一种可靠而经济的解决方案，能够解决硬磁材料在较高温度下的测量问题，现在我国的标准 JB/T 8986—1999 也采用了这种方法。在这种检测方法中，两侧极头均被分为内外两层，与样品接触的外侧极头通过加热盘加热，绝热板隔离内、外极头。样品的温度通过埋在外层极头中的热电偶检测，但是必须保证测量样品和外层极头之间温度关系确定并已知。测试线圈支架由特殊的抗热材料制成，绕法与常温测量线圈无异。

图 2.6-10 所示为 JB/T 8986—1999 规定的高温测量系统，由电磁铁上、下两个极头组成，每个极头在紧贴加热盘处装有一个隔热层，接着是一对由纯铁或铁钴合金制成的极面，试样、J（或 B）感应线圈和 H 测量系统一起安放在测量极面之间，在上下磁极中各插入一个热电偶或铂电阻用来测量极头的温度。测量之前，须检查试样和极面的温度是否稳定。而且由于试样可能具有不同的几何形状和热特性，极面与样品的温度就有可能因此产生相当大的不同，在一系列的单独实验中重新建立试样与极面之间的温度关系是很有必要的。

以上提到的高温测量系统均适用于 200℃ 以内进行测

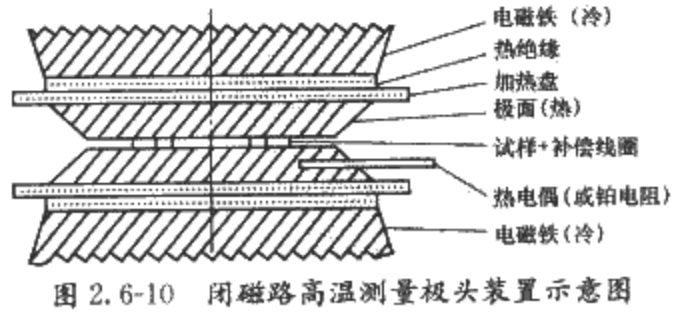


图 2.6-10　闭磁路高温测量极头装置示意图

量，然而 SmCo 类的稀土永磁体具有更高的居里温度，在高科技尤其是航天、国防等领域应用广泛，需要在 400～500℃，甚至更高的温度下检测磁体的性能。然而无论是 IEC 及国标都对此没有规定。针对这一问题，中国计量科学研究院磁性测量室近来成功研发了可以在 500℃的高温范围测试硬磁体磁性能的装置，解决了这一问题。

2.4.2 温度系数测量方法

温度系数的温度测量范围可按有关标准或由需要确定，常见的温度范围为室温至 100℃左右。为了测出可逆的温度系数，要对试样进行温度循环处理，即在室温到高于测量温度 20℃的温度范围内，将试样从室温加热到高于测量温度 20℃后再缓慢冷却至室温。这种温度循环至少进行一次，之后开始测量，其方法为：

（1）首先用最大磁化场将样品磁化至饱和。在室温条件下先测出常温下的退磁曲线。

（2）将样品再一次磁化至饱和或接近饱和。

（3）把样品放置到已经加热至 T_2 的加热极头中，并保留约 5min 后，开始测量。测出 T_2 温度下的退磁曲线。

（4）将测得的 T_1 和 T_2 温度下所对应的 B_r 和 H_{cJ} 值按式（2.6-43）和式（2.6-44）分别计算出剩磁的温度系数 α_{B_r} 和内禀矫顽力的温度系数 $\alpha_{H_{cJ}}$：

$$\alpha_{B_r}=\frac{B_rT_2-B_rT_1}{B_rT_1(T_2-T_1)}\times 100\% \qquad (2.6\text{-}43)$$

$$\alpha_{H_{cJ}}=\frac{H_{cJ}T_2-H_{cJ}T_1}{H_{cJ}T_1(T_2-T_1)}\times 100\% \qquad (2.6\text{-}44)$$

2.5 闭磁路测试系统的校准

2.5.1 电子积分器的校准

2.5.1.1 互感法

采用标准互感校验磁通表是最先提出的方法。采用标准互感法，其次级端与积分器输入端相连，初级与标准电阻和直流源相连，当开关 k 合上时，标准互感线圈中产生一脉冲电压。

标准互感 M 取 10～20mH 为宜，通常它有 2～3 个一次线圈和一个二次线圈。标准互感的误差小于 10^{-3}。初级电流用数字电流表或其他方法测量，测量误差小于 5×10^{-4}。这样，校验系统的总误差在 10^{-3} 左右。校验时，应使用无锡的铜线，整个系统避免温升、热电势引起的误差。电流调节采用十进制电阻箱 R。为了兼顾互感和磁通表的灵敏度，可通过一个换向开关改变电流，从而按下式计算总磁通。

$$\Phi=MI[\mathrm{Vs}] \qquad (2.6\text{-}45)$$

测量时，互感线圈应远离外磁场源，互感线圈的初级引线和次级引线应互相交接。调节电流用的电阻箱和开关应保证质量稳定。

为了提高信号，可采用导向开关，电流变化为：$-I$～$+I$，这样产生 2MI 信号。用互感法校验磁通表的缺点是：互感线圈的阻抗、初级线圈的电流容量限制了校验范围；互感线圈的频率特性、次级线圈电阻限制了校验的准确度。

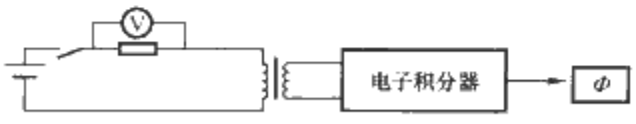


图 2.6-11 互感法积分器校准原理图

2.5.1.2 标准磁场法

这种方法采用标准磁场和标准线圈，从而产生标准磁通校验磁通表。标准磁场一般采用均匀性好的永久磁铁或电磁铁，并采用准确度高达万分之几的磁强计（如核磁共振磁强计）为标准磁场定标。这种方法直观，测量速度较快。将已知匝面积的线圈放入已知磁场值且具有足够均匀区的磁场内（或将线圈翻转），根据下式即可对积分器进行校准。

$$\Phi=NSH[\mathrm{Vs}] \qquad (2.6\text{-}46)$$

$$\Phi=2NSH[\mathrm{Vs}]\text{（线圈翻转）} \qquad (2.6\text{-}47)$$

线圈匝面积可由几何形状算出或准确测量出。此种方法的准确度主要取决于标准场的均匀区以及线圈匝面积。值得注意的是：线圈的连接线务必绞合以免杂散场引入带来校准误差；线圈的中心线应与磁场磁力线平行。

使用这种方法的缺点是：标准线圈常数和标准磁场的大小限制了校验的范围；标准测量线圈的电阻及其轴线与磁场方向的偏角、磁场的均匀性和稳定性、噪声及杂散磁场等影响测量的准确度。



图 2.6-12 标准磁场法积分器校准原理图

2.5.1.3 伏秒定标法

从磁通的量纲［Vs］可看出，积分器的校准可以采取输入一已知且准确的电压，并且持续一精确的时间，积分器将经时间积分获得磁通量 Φ。

这种方法要求制作宽范围、高精度调整电压的时间积分值的单扫描电压波形发生器，例如宽度为 10s、高度为 1V 的单扫描方波的时间积分值。

$$\Phi=U_et[\mathrm{Vs}] \qquad (2.6\text{-}48)$$

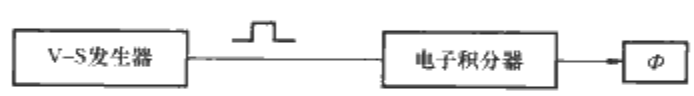


图 2.6-13 伏秒法积分器校准原理图

此种方法的准确度取决于电压、时间的测量准确度以及脉冲电压的方形度，特别是上升沿和下降沿的方形度。提供伏秒发生器的主要厂家有：美国的 WALKER-LDJ 公司、中国计量科学研究院磁性测量室等。此种伏秒发生器输出范围通常为：10^{-4}、5×10^{-4}、10^{-3}、5×10^{-3}、10^{-2}、5×10^{-2}、0.1、0.5Vs。

伏秒定标法的缺点是：准确的方波其前、后沿在制作上有困难；方波电压作为磁通表的输入使得磁通表的积分放大器的频率特性成为主要误差源。

2.5.2 霍尔磁强计的校准

2.5.2.1 核磁共振磁强计法（NMR）

NMR 是目前广泛应用于各国国家标准实验室（如 PTB 联邦德国，NPL 英国，NIM 中国等）的磁场校准方法。NMR 的准确度通常好于 0.01%。

2.5.2.2 永磁体标准场

永磁标准场是指选用低温度系数、高剩磁且易于加工的两块永磁体，用相应的磁轴连接，然后对永磁体充磁，这样在两块永磁体气隙之间产生均匀磁场，该磁场用 NMR 进行定标，就获得永磁体标准场，将霍尔片放在标准场均匀区，就可以对霍尔磁强计进行校准。该校准方法的准确度取决于永磁体标准场的均匀区、永磁体的稳定性以及校准时的温度，一般来说可以达到±0.5%。

另外，校准方法缺点是单点校准，即校准场值不能改变。MPS、WALKER 等厂家提供的标准场值通常在 0.25～1T 之间。

2.5.2.3 标准线圈法（亥姆霍兹线圈）

亥姆霍兹线圈是由一对半径相同共轴平行放置、且间距

等于半径的线圈组成。它提供均匀磁场 $H=CI$，式中 C 为线圈磁场系数，I 为流过亥姆霍兹线圈的电流；其均匀区大小如图 2.6-14 所示。

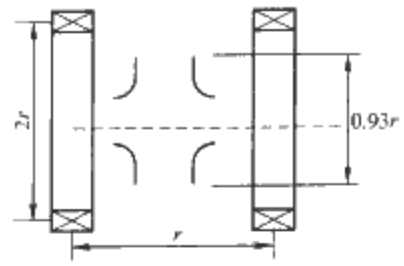


图 2.6-14　亥姆霍兹线圈及其均匀区示意图

采用亥姆霍兹线圈场校准准确度一般来说可以达到 ±0.5%，它取决于电流 I 稳定性、准确度以及线圈常数的准确度，线圈常数可以采用 NMR 定标。此种校准方法的缺点是磁场范围窄，一般用于低磁场校准（通常可达 80kA/m）。

2.5.2.4　积分器＋H线圈法

采用一已校准积分器和已知匝面积的 H 线圈（H 线圈的面积应尽量小），将 H 线圈紧贴霍尔片，放入一静磁场，然后用积分器测得的 B 值对霍尔磁强计进行校准。此方法的准确度不够高，但在测量准确度要求不高的情况下，是一种比较简单实用的方法。

2.5.3　J 线圈的校准

对一个制作完毕的 J 线圈，必须知道三个参数：有效匝数、残余匝面积、绕线电阻。对以上三个参数的测量方法如下：

（1）J 线圈有效匝数的校准。用 J 线圈测量一个永磁标样的剩余磁通 Φ_r，在已知标样剩磁 B_r 的情况下可计算得：

$$N_e = \frac{\Phi_r}{SB_r} \tag{2.6-49}$$

式中：N_e 为有效匝数；S 为标样的截面积。

具体测量步骤如下：

1）J 线圈套在标准样品上，将样品放入电磁铁中使之构成闭合磁路。

2）设定好磁场探测器位置，加外磁化场到样品磁化饱和。

3）调节励磁电流使电磁铁极头间磁场强度为零，调节积分器零点使其处于积分态（注意磁场强度应单调连续变到零）。

4）打开电磁铁极头，将 J 线圈从样品中取出并远离样品。此时积分器测得的磁通变化就是剩余磁通 Φ_r。

因为线圈的有效匝数是正整数，在按上式计算时，应对计算结果取整。

（2）J 线圈残匝面积的测量。将 J 线圈放入均匀磁场中，J 线圈与一校准的积分器相连接。用霍尔磁强计测量磁场强度。当磁场强度从零变到 H_m 时，记录下 J 线圈内磁通的改变量 $\Delta\Phi$，则残匝面积 ΔN_s 为：

$$\Delta N_s = \frac{\Delta\Phi}{\mu_0 H_m} \tag{2.6-50}$$

J 线圈在制作过程中，由于受加工精度的限制，往往都有残匝面积的存在。在测量出它的大小后，解决的方法是：用一小线圈进行补偿或用计算的办法进行补偿。

利用镍标样可以同时校准 J 线圈的有效匝数和它的残匝面积。从磁化特性可知，当外磁化场 H 足够大时饱和磁化强度与磁场强度的关系满足饱和渐进公式：

$$M = M_s\left(1-\frac{a}{H}-\frac{b}{H^2}\right)+\chi\mu_0 H \tag{2.6-51}$$

对于纯镍样品，a/H 项可以忽略；式中与磁场成正比的项在磁场强度小于 800kA/m 时的影响小于 0.1%；b/H^2 项在 $H>200$kA/m 后小于 0.02%。因此在测量时只要将磁化场加到大于 200kA/m，$M=M_s$。IEC 文件对镍推荐的饱和磁化强度值为 485.6kA/m。校准的具体做法是：

测量镍样品的饱和磁滞曲线，根据上面的分析，在曲线的饱和部分 J 应为一常数。而有残匝存在时 J 线圈内磁通的变化为：

$$\Phi = (N-M)JS+(NA_1-MA_2)\mu_0 H \tag{2.6-52}$$

在饱和区域作 $\Phi-H$ 曲线，直线部分的延长线与 Y 轴相交，设交点处的磁通值为 Φ_0，则：

$$N_e = \frac{\Phi_0}{JS} \tag{2.6-53}$$

$$\Delta N_s = NA_1 - MA_2 = \frac{\Phi_m-\Phi_0}{H_m\mu_0} \tag{2.6-54}$$

（3）J 线圈绕线电阻。由于 J 线圈绕线匝数较多，其电阻值可达几十欧姆，有可能影响积分器的测量精度，因此有必要测量它的阻值。但对电阻测量的精度有百分之几就足够了。设 J 线圈的电阻为 r，积分常数为 $k=1/RC$。考虑 r 的影响，则有：

$$k' = \frac{1}{(R+r)c} = \frac{1-\dfrac{r}{R}}{RC} = k\left(1-\frac{r}{R}\right) \tag{2.6-55}$$

式中：$1-r/R$ 为修正系数，一般 R 的数量级 1000Ω；r 为 10Ω。由 r 引入的误差约为 1%。因此 r 测量的误差在百分之几时引入的误差只有万分之几，可忽略不计。

2.5.4　H 线圈的校准

H 线圈的校准可以参考霍尔磁强计的校准方法。H 线圈与校准过的积分器相连，然后将其放入标准磁场中，根据下式即可对 H 线圈进行校准。

$$NS = \frac{\Phi}{H} \tag{2.6-56}$$

3　开磁路测量

有些硬磁材料的测量必须诉诸于开磁路方法，这是因为：①稀土永磁体的内禀矫顽力常常很高，普遍使用电磁铁的闭路磁滞回线仪对此无能为力，不仅不能将其饱和磁化（例如要饱和磁化内禀矫顽力为 1.5×10^3kA/m 的 NdFeB 材料，需要至少 5×10^3kA/m 的外磁场），即使借助其他设备能够饱和充磁，仅测量其退磁曲线也有可能遇到很大困难。这是由电磁铁自身的局限性决定的。尽管如今商业闭路磁滞回线仪配备了多种可调换的极头，也远远不能解决这一难题；②闭路测量对样品的尺寸和形状有着严格的限制，而被测样品形状往往达不到标准测量的要求，如：被测样品具有超大（或超小）尺寸、形状特殊、易碎、难加工或者加工成本高等等。

开路测试方法恰好可以弥补这些问题。开路测量中，普遍采用的超导螺线管可以提供 10T 以上的强磁场。脉冲磁场测量仪更可以产生 10～100T 的超强外磁场，能够解决任何高内禀矫顽力硬磁材料的饱和磁化问题。由于不需要严格与极头构成闭合回路，在开路测量中，不限制任何形状的样品，对于超小尺寸样品的测量，一些具有高灵敏度的开路方法具有不可替代的优势。

3.1　振动样品磁强计（VSM）

如果将一个开路磁体置于磁场中，则此样品外一定距离

的探测线圈感应到的磁通可被视作外磁化场及由该样品带来的扰动之和。多数情况下测量者更关心的是这个扰动量。在磁测领域，区分这种扰动与环境磁场的方法有很多种。例如，可以让被测样品以一定方式振动，探测线圈感应到的样品磁通信号因此不断快速地交变，保持环境磁场等其他量不做任何变化，即可实现这一目的。这是一种用交流信号完成对磁性材料直流磁特性测量的方法。因为在测试过程中，恒定的环境磁场可以直接扣除，而有用信号则可以通过控制线圈位置、振动频率、振幅等得以优化。

振动样品磁强计（VSM）正是基于上述理论。VSM 是一种高灵敏度的磁矩测量仪器。它采用电磁感应原理，测量在一组探测线圈中心以固定频率和振幅做微振动的样品的磁矩。对于足够小的样品，它在探测线圈中振动所产生的感应电压与样品磁矩、振幅、振动频率成正比。在保证振幅、振动频率不变的基础上。用锁相放大器测量这一电压，即可计算出待测样品的磁矩。

VSM 可以实现很高灵敏度的测量，商业产品的磁矩灵敏度往往好于 $10^{-9}\,\mathrm{Am}^2$，精确地调整样品与线圈的耦合程度可以使这一参数低至 $10^{-12}\,\mathrm{Am}^2$。另一方面，用 VSM 进行磁矩测量的范围上限能够达到 $0.1\,\mathrm{Am}^2$ 或更高。

3.1.1 振动样品磁强计原理

假设一个小样品具有磁矩 m 并可被等同为一个点，并将此样品放在一个半径为 R 的测试线圈平面上，我们将此样品看做一个偶极子处理，即一个小环形电流，其电流强度为 i_m，面积为 a，因此 $m=ai_m$。以探测线圈为原点，设偶极子所在位置为(x_0, y_0)，我们再假设在测试线圈中同时存在一个电流 i_s，此时这两个环形电流可认为互相耦合。类似于互感器，它们之间具有互感系数 M，两者之间的磁通为：$\Phi_{ms}=Mi_s$ 或 $\Phi_{sm}=Mi_m$，前者为从线圈链向磁偶极子的磁通，后者相反。

探测线圈在磁偶极子处产生平行于 z 轴的磁感应强度 $B_z(x_0, y_0)$。这里定义一个重要的特征参数——探测线圈常数 $k(x_0, y_0)=B_z(x_0, y_0)/i_s$。从线圈链向磁偶极子的磁通还可以写为 $\Phi_{ms}=B_z(x_0, y_0)a$，则互感系数为：

$$M=[B_z(x_0,y_0)/i_s]a=k(x_0,y_0)a \tag{2.6-57}$$

于是偶极子链向探测线圈的磁通最终可以写为：

$$\Phi_{sm}=k(x_0,y_0)m \tag{2.6-58}$$

推而广之，如果偶极子处于更一般的位置(x, y, z)，则有：

$$\Phi=k(x,y,z)m=k_x(x,y,z)m_x+k_y(x,y,z)m_y+k_z(x,y,z)m_z \tag{2.6-59}$$

其中，$k(x, y, z)=B(x, y, z)/i_s$，如果这个偶极子以 $\frac{dr}{dt}$ 的速度移动，那么探测线圈中产生的即时感应电压则为：

$$u(t)=\frac{d\Phi}{dt}=\frac{1}{i_s}\cdot\mathrm{grad}(B\cdot m)\frac{dr}{dt} \tag{2.6-60}$$

举一个简单的例子，图 2.6-15(a)所示的一对串联线圈能够产生 x 轴向的磁场 $B_x(x)$，两线圈完全相同，半径为 a，间距为 d(若 $a=d$ 即是所谓的亥姆霍兹线圈)。将一个磁矩为 m 可等同为磁偶极子的样品放入线圈中心，并以速度 $\frac{dx}{dt}$ 移动，则有：

$$u(x,t)=\frac{d}{dx}[mk_x(x)]\frac{dx}{dt}=mg_x(x)\frac{dx}{dt} \tag{2.6-61}$$

其中，$k_x(x)=B_x(x)/i_s$，而：

$$g_x(x)=\frac{dk_x(x)}{dx} \tag{2.6-62}$$

式中：$g_x(x)$ 称为灵敏函数。图 2.6-15(b)，$g_x(x)/g_x(o)$表示相对灵敏函数。

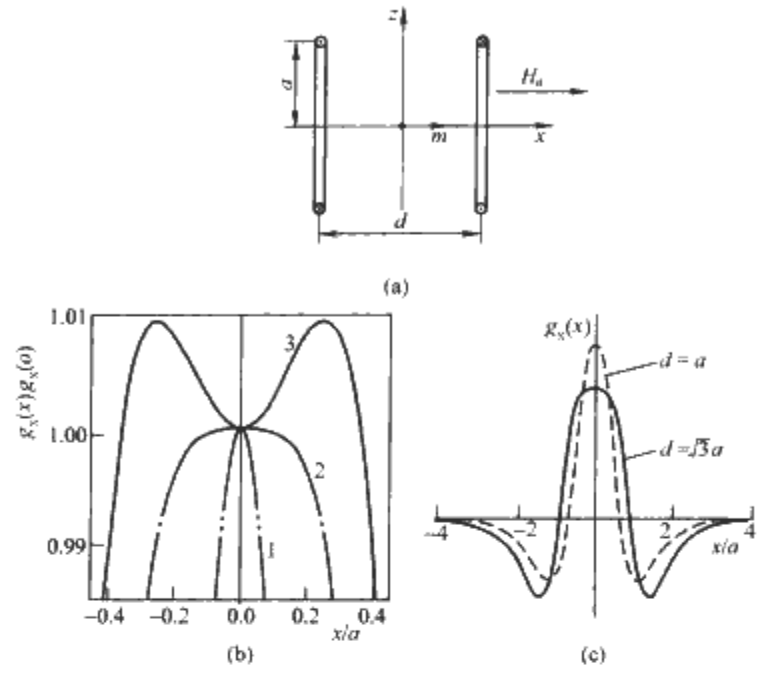


图 2.6-15 串联线圈及其特性曲线

(a)半径为 a，间距为 d 的一对完全相同的串联线圈；(b)距离分别是 a、$\sqrt{3}a$、$1.848a$ 时相对灵敏函数与偏离位移曲线；(c)$\pm 4a$ 偏离范围内的灵敏函数曲线

图 2.6-15(b)中为两线圈半径为 a，距离分别是 a、$\sqrt{3}a$、$1.848a$ 时，相对于磁偶极子偏离中心所移动距离而得到的相对灵敏函数关系曲线。

从图中可以看出，当 $d=\sqrt{3}a$ 时，灵敏函数在中心位置处变化最平缓，即具有最好的均匀性。从图中我们还可以看出这三种设计的中心点处 $\partial g_x(x)/\partial x$ 都为 0，这是由线圈的对称结构所决定。在线圈的设计和其位置的选择过程中，往往需要这样的鞍点，即图 2.6-15(b)中中心处平坦的顶点，这是因为在鞍点附近，线圈能够最大限度地对样品所处的位置不敏感。对于一个在中心点以小振幅振动的样品来说，可以放心地认为 $g_x(x)=g_x(0)$，下式更能说明这一点，若一个样品在中心处作简谐振动，$x(t)=X_0\sin\omega t$，则线圈中的感应电压即为：

$$u(t)=mg_x(x)\frac{dx}{dt}=mg_x(x)X_0\omega\cos\omega t \tag{2.6-63}$$

如果处于鞍区，即 $g_x(x)=g_x(0)$，则 $u(t)$仅与样品的磁矩、振动频率和振幅有关，而排除了灵敏函数的影响，这为测量提供了极大的便利条件。

线圈位置的设置，应首先满足鞍点条件。随着 VSM 技术的不断发展，线圈设计方法也不断推陈出新。在采用超导线圈获得磁场的系统中，通常使样品沿 x 轴方向振动，前面提到的串联反接双线圈结构被这类系统所广泛使用。当 VSM 磁场由传统的电磁铁或永磁体提供时，样品振动的方向通常设置为 z 轴，这种情况式(2.6-61)改写为：

$$u(z,t)=\frac{d}{dz}(mk_x(z))\frac{dz}{dt}=mg_x(x)\frac{dz}{dt} \tag{2.6-64}$$

其中，$k_x(z)=B_z(0, 0, z)/i_s$，灵敏函数变为：

$$g_x(z)=\frac{dk_x(0,0,z)}{dz} \tag{2.6-65}$$

图 2.6-16 列举了一些常见的 VSM 线圈结构设计。其中包括双线圈、四线圈以及八线圈，线圈均为对称结构，均首

先满足鞍点条件。此外，图 2.6-16 所示的各种结构，都为补偿线圈，即测量信号能够不受环境磁场的影响。其中四线圈结构又称为 Mallinson 结构，是 VSM 设备中最为常见的线圈设计。而八线圈结构是后来发展起来的，它能够感应样品 m 在 x，y，z 三个方向的分量，图 2.6-16(c)所示为用于 m_x 分量的测量，其他分量的测量可以通过改变连接方式得以实现。

必须指出，线圈结构的设计虽可以显著改善鞍区宽度，然而鞍区宽度的增加又是以损失电压输出信号作为代价的，如图 2.6-16(d)所示。增加线圈匝数虽可提高信号水平，但同样会导致线圈的电阻增大，噪声提高，不利于提高灵敏度。

目前为止，所有针对灵敏函数的讨论都是基于一个重要的假设——样品可以当作一个点，即磁偶极子处理。如果这样的假设不成立，我们就必须考虑灵敏函数在样品空间内的变化，如果样品还非椭球类形状，那么样品各处磁化不均匀的问题也不容忽视。还以图 2.6-15 的串联反接双线圈为例，一个体积为 V 的样品沿 x 轴振动，则式(2.6-61)需改动为对整个样品体积作积分：

$$u_x(x,t) = \int_V M_x(r,x) g_x(r,x) \mathrm{d}r^3 \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \tag{2.6-66}$$

式中：r 代表 V 中的任一点，对于椭球类样品，其磁化强度各处均匀，式(2.6-66)能简化为：

$$u_x(x,t) = \frac{m}{V} \int_V g_x(r,x) \mathrm{d}r^3 \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \tag{2.6-67}$$

此外，从图 2.6-15(c)还能够看出样品尺寸不宜过大，如 x 轴方向尺寸过长，将导致输出信号减弱甚至为零。

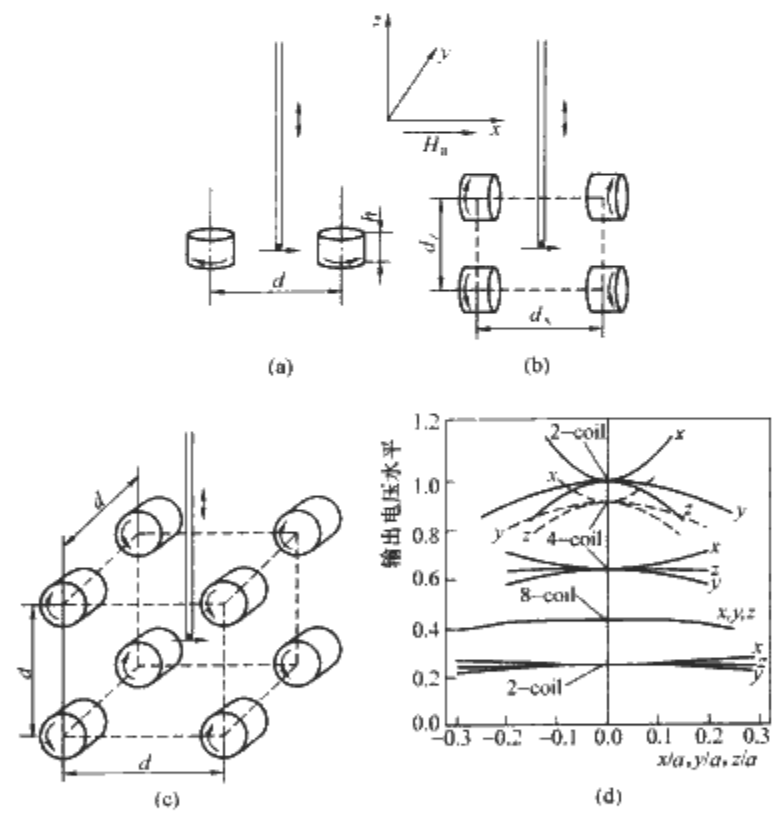


图 2.6-16　振动样品磁强计的探测线圈结构示意图
(a) 双线圈；(b) 四线圈；(c) 八线圈；(d) 线圈电压水平

3.1.2　振动样品磁强计的测试方法

前面介绍的为振动样品磁强计的基本原理。要将这些原理变为现实，以下装置必不可少：

(1) 稳定、可靠的振动系统。

(2) 数字化控制的磁场源（超导线圈或电磁铁）。

(3) 锁相放大器，用于线圈感应信号的选频和放大。

(4) 辅助同步信号源，与样品振动同频率，用来精确控制样品振幅。

(5) 磁场测量系统。

(6) 控温系统（如果需要测量温度特性）。

此外，计算机负责控制测试及结果的处理，图 2.6-17 显示了振动样品磁强计的基本结构。

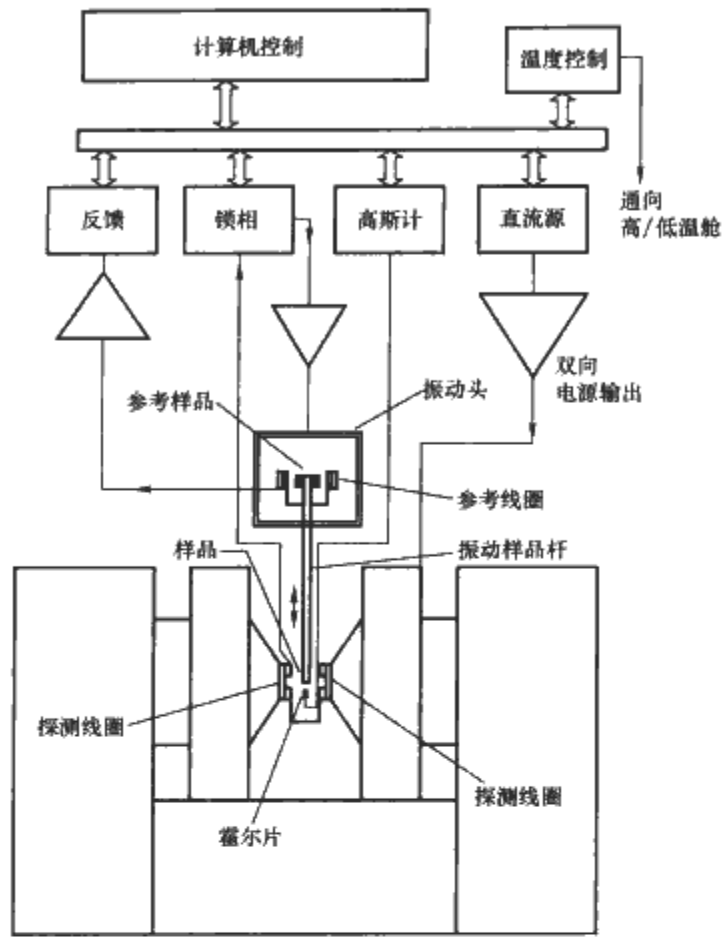


图 2.6-17　采用电磁铁作为磁场源的
振动样品磁强计的结构框图

3.1.2.1　磁场的获得与控制

和传统的闭路磁滞回线仪一样，外加磁场相对于时间作连续的变化更有利于获得样品磁矩与磁化场的对应关系。VSM 测试过程中，探测线圈感应到的电压需要及时、同步地记录并处理已获得样品的磁矩信息。然而实际上，为了获得较高的信噪比，必须对信号进行积分（不同于闭路测量中积分器所作的积分）以获得平均值，这通常要花费 1s 或更长的时间。被测信号越弱，所需时间越长，磁矩测量相对于磁场变化的后滞作用越明显。为解决这一问题，通常将磁场设置为阶跃变化，每一步阶跃过后系统对磁矩进行测量和计算。此外，鉴于材料的非线性行为，沿着磁滞回线每一步阶跃磁场的变化幅度都应相同，以获得均一的磁矩分辨率。

做到这一点的方法是采用实时反馈程序，通过霍尔片测得间隙磁场强度，与设定的磁场值进行比较，然后经合适的算法以得到精准的励磁电流。

和闭路测量相比，用 VSM 作磁滞回线测量，由于没有零点漂移问题，测试过程可以持续数分钟。不足之处在于——样品附近放有探测线圈，振动样品杆，电磁铁间隙所能获得的最大磁场明显低于闭路测量。为了提高感应灵敏度，在保证合适鞍区的情况下，探测线圈无疑可以尽量靠近样品所在位置，从而使间隙减小。然而，另一方面，极头平面与样品和线圈的距离又不能太小，以降低镜像效应带来的影响。整个机构的位置应满足样品出来的磁力线能很好地被探测线圈捕获，尽量少地被镜像效应干扰。

大多数 VSM 使用电磁铁作为磁场源，在闭路测量部分我们已经提到电磁铁获得磁场强度范围的局限性，这一问题对于 VSM 更为突出。不难理解，VSM 的电磁铁极头中间

放有线圈结构，这必然会增大两极间距，从而使电磁铁最大磁场下降，而且镜像效应问题也会加大这种趋势。通常，VSM使用的电磁铁能产生的磁场约为2T左右，和闭路测量系统一样，这样的磁场不足以完全表征稀土永磁等高内禀矫顽力材料的磁特性。为获得更高的磁场，在VSM系统中广泛应用的是超导螺线管线圈，这一装置较为复杂，由于该装置运行时需要不间断液氦冷却，其造价、维护费用都十分高昂。相对于工业应用而言，具备有超导线圈的VSM更适合于实验室进行物理、生物等理论研究。

超导螺线管是用超导电缆在龙骨上绕制而成的，超导电缆则是由大量超导材料浸在电阻性的基体上制成的。NbTi材料制成的超导电缆在液氦的沸点能够产生9T左右的磁场，而Nb_3Sn材料可以获得高达20T的最大磁场。

在采用超导螺线管产生磁场的VSM装置中，该螺线管处于一套低温保护装置内，杜绝了包括传导、对流、辐射在内的所有同外界的热交换方式。螺线始终浸在液氦当中。被测样品则置于一个可变温度容器，此容器位于螺线管的孔心内。同轴测试线圈位于磁场内，为了抵消振动给外磁场带来的影响，两套线圈都为串联反接，它们具有相同的匝面积，不同的灵敏函数。这样做虽使来自样品的信号水平有所降低，但外磁场的扣除可以带来极佳的信噪比。

除此以外，VSM系统的磁场源也可以用永久磁铁来产生，它不需要供电电源且磁场稳定，但磁场不能变化。为了解决这个问题，近来也开始有可变磁场的永久磁铁VSM系统面世。

3.1.2.2 测试样品的准备

永磁体样品大多做成2～3mm直径的小球。对于VSM开路测量来说，球形样品无疑是最佳样品形状，这样做保证了样品各个部位磁化的均匀性，且经过退磁场修正以后能够精确地还原出样品的有效磁化曲线。

然而这并不表明VSM仅能够测量球形样品，其他形状的样品，甚至包括不规则形状样品一样可以进行VSM开路测量。对于圆柱体、平行六面体形状的样品，根据其形状参数可查阅相关资料获得自退磁因子并进行退磁场的修正；对于磁带或薄膜样品，将其做成圆盘的形状最易接受，因为圆盘的退磁因子大致等同于一个两轴相等的扁椭球。其他具体形状可以进一步查阅相关书籍，找到相应的估算方法。

测试样品通常置于振动样品杆低端的样品舱，如果各向异性的样品已被做成小球形，从外观上很难判断其宏观各向异性轴，为了找到此方向，可将小球自由放置于一个较强的磁场中，根据其自由取向即可得到其各向异性轴。如确实需要精确的样品取向，则可以连续变换方向并测量回线，直到找到剩磁最大值的方向。

从上述内容不难看出，VSM开路测量的优势之一即是对样品的形状不做严格要求，各种闭路方法无法测量的样品形状，只要设法进行合适的自退磁场修正，都能够有效测得样品的磁特性。

在测试以前，样品居中是必不可少的一步。这里的“居中”包含三层意思，即：首先必须满足灵敏函数的鞍点要求（以z轴方向振动为例）；其次保证两极头关于样品镜像对称；最后每次测试样品位置相同，以确保测试的复现性。假定探测线圈已置于合适的位置，使样品杆开始振动并施加一个足够高的磁场，居中的过程就是在这种条件下，在x，y，z三个方向上调节样品的位置，最终使其处于鞍点。以四线圈Mallinson结构而言应做到：使线圈感应电压在样品沿x方向上位移时最小，在沿y轴和z轴方向移动时，感应电压最大。必须指出，居中以后，样品存在一定的剩余磁感应强度，在进行正式测量之前，有必要将其退磁。

3.1.2.3 振动频率与振动幅度的控制

为实现高精度的测量，要求探测线圈的输出电压仅与被测样品磁矩成正比，因此仪器必须能够保证振动振幅和振动频率不变。因此仪器在设计中应当尽可能保证振动振幅和振动频率不变，探测线圈也不应受振动影响。为进一步减少振幅变化和频率变化对测量结果的影响，在振动杆上部放置一个已被磁化的永磁标样，此样品通过两侧对称放置的一对基准线圈产生一个标准电压信号，该信号经锁相放大器放大后送入软件系统与目标信号做对比，因为这两个电压的相位和振幅直接相关，任何信号上的差别都可以从这种对比得出，然后，标准信号通过反馈不断调整使自身符合预定的振动频率和振幅。从而使振幅的变化、振动频率微小的不稳定性、放大器的增益和线性等对测量的影响不大。另外，VSM对样品的振动频率没有特别要求，只要不引起与其他设备的机械共振，也不要与市电同频。

3.1.2.4 校准

通过灵敏函数的计算，理论上的确可以实现对样品磁矩的绝对测量，然而实际上，由于线圈形状、样品到线圈的距离等参数都不易准确确定，灵敏函数就变得很难直接计算，即使可以，其计算结果的准确性也不高。因此实际应用中常采用已知磁化强度的样品（如镍球）定标的方法。或者直接采用相对的方法对试样进行测量，如果用已知饱和磁化强度M_c、直径为D_c的标准样品小球取代被测试样进行测量，探测线圈中的感应电压为u_c，用比较法就可以测得被测试样的磁化强度：

$$M_s = \frac{u_s}{u_c}\frac{D_c^3}{D_s^3}M_c \tag{2.6-68}$$

式中：M_s、D_s、u_s分别为被测样品的磁极化强度、直径和探测线圈中的感应电压。

镍标样定标同样存在一些缺点，需要注意：

（1）若测试样品与镍标准样品球尺寸上相差太多，校准过程将会因为灵敏函数曲线上的鞍区不理想而受到影响。

（2）对比校准建立在磁偶极子假设基础上，不符合此要求的其他样品（如薄膜）进行校准时，将无可避免地带来系统误差。

3.1.3 振动样品磁强计的应用

振动样品磁强计最初是由弗尼尔(S. Foner)提出的。他对磁强计的结构，各种探测线圈及其对灵敏度的影响都做了详细的论述。经过约半个世纪的发展，如今VSM已是磁性实验室中应用范围很广的测试设备，自从锁相放大技术开始在VSM上得到应用以来，使其灵敏度得到了极大范围的提升，适用范围也不断得到拓展，除永磁材料以外，VSM适合于测试以下材料：亚铁磁、反磁性材料、顺磁材料和抗铁磁材料；各向异性材料；磁记录材料；磁—光学材料；稀土和过渡元素、非晶金属、高导磁率材料、金属蛋白等形式的铁磁物质。弱磁、顺磁等样品虽然可以用VSM测量，其灵敏度相比于大多数永磁体或磁记录介质而言是有所下降的。

此外，VSM还适用于块状、粉末、薄片、单晶和液体等多种形状和形态的材料，能够在不同的环境下得到被测材料的多种磁特性。可以直接从测试中得到的内容包括：$B-H$曲线、$M-H$曲线、初始化磁化曲线，磁滞回线上的各参数，并能够测量材料的各向磁特性（m_x，m_y，m_z），由于VSM探测线圈的信号未经过积分就直接送到分析系统，不存在积分器漂移的情况，因此如果配备有低温罐或高温炉，

则可以以温度为变量测量由过渡温度和居里点决定的磁化函数。

3.2　亥姆霍兹（Helmholtz）线圈测量

当前铁氧体、钐钴、钕铁硼被广泛使用，但是很多情况下其磁化方向的长度却很短。前述的两种测量技术——振动样品磁强计（VSM）和闭路磁滞回线仪是测量磁滞回线或第 2 象限曲线的常用方法。这两种方法可以给出比较完整的信息，但是被测试样必须被切成特殊的形状，导致样品被破坏。同时由于样品准备时间过长，不适合大量测试。

永磁的测量也常常使用一种简单的开路点测量方法——亥姆霍兹（Helmholtz）线圈磁矩测量法。该法仅能确定退磁曲线上的某一点，无法反映材料的全部特性。但是其优点是测量简便、不破坏样品，因而被广泛应用于成品检验。亥姆霍兹线圈开路测量通常由两部分组成：亥姆霍兹线圈和磁通计。

3.2.1　亥姆霍兹线圈磁矩测量

3.2.1.1　亥姆霍兹线圈的结构

如图 2.6-18 所示，亥姆霍兹线圈是由两个完全相同的薄的平行的线圈组成，两线圈之间的距离与线圈的半径相等，两线圈的信号串联连接起来。线圈的框架和支撑体系必须是非金属的，线圈的半径选择至少是最大被测样品的 2.5 倍，这一限制条件可以使所有的样品都处于线圈的均匀区中。线圈匝数一般采用 100 或更多匝数。通常亥姆霍兹线圈用来产生小的均匀磁场，这一概念可以反过来使用，用于开路样品磁通测量。测量时应远离有磁场干扰的区域，如：其他的磁体，变压器，或者是荧光源。

3.2.1.2　亥姆霍兹线圈的测量原理

相对传统的铝镍钴磁体而言，高矫顽力的永磁材料如铁氧体、钐钴、钕铁硼磁体不规则形状使用得更多。实际应用的高矫顽力磁性材料长度一般比较短，可以充分利用它的 BH 线性特性。例如钐钴和钕铁硼的尺寸小于 3mm，在这种情况下用感应线圈或霍尔探头来测量是不合适的。用感应线圈来测量小的磁体是很难做到样品和线圈的位置固定从而得到重复的读数。同样用霍尔探头测量小磁体变得愈来愈不可靠，因为这种情况磁体的表面和探头的距离影响非常大，必须精确确定探头和样品表面的距离。亥姆霍兹线圈解决了这一困难。

亥姆霍兹线圈同样基于电磁感应原理，根据式(2.6-59)，任何位于小磁体(磁矩为 m)附近的线圈受该磁体影响，感应到的磁通为 $\Phi=k(x,\ y,\ z)m$，k 是样品处的线圈常数。如果样品不能被看做一个点，则对样品的整个体积积分有：

$$\Phi=\int_V k(x,y,z)\cdot M(x,y,z)\mathrm{d}V \qquad (2.6\text{-}69)$$

如果线圈沿 x 轴轴向对称，而且又能在某处产生一个 K_x 的均匀区，那么线圈感应到的磁通将与样品 x 方向的磁矩成正比：

$$\Phi=\int_V M_x(x,y,z)\mathrm{d}V=k_x m_x \qquad (2.6\text{-}70)$$

螺线管线圈能够满足这样的均匀区，但却不易操作，而亥姆霍兹线圈能够在其中心获得足够大的均匀区且样品取放方便，使得这种简单的磁矩测量方法广为普及，亥姆霍兹线圈的线圈常数 $k_x(x)=B_x(x)/i_s=0.7155\mu_0(N/a)$，其中 N 为亥姆霍兹线圈的匝数，$a$ 为其半径。为获得最好的均匀区，亥姆霍兹线圈应该设计成接近理想的“薄线圈”，通常，亥姆霍兹线圈可以保证在相对较宽的范围内均匀性好于 1%。

3.2.1.3　亥姆霍兹线圈开路测量方法

如图 2.6-18 显示了亥姆霍兹线圈的开路测量装置。将整套装置放到无磁的环境中，最好放置到木桌子上。如图 2.6-18 所示，测量时把磁体放在线圈的中心位置(均匀区)，磁体的磁化强度沿 x 轴方向，即与线圈的轴向平行。串联连接起来的两线圈信号直接传送到磁通计。调节磁通计零点后，把磁体移出线圈，使它与线圈轴平行。移出的距离一般是 75～100cm，这样做是让样品对读数没有影响。通过电压对时间的积分(磁通)，即可以得到样品的开路磁矩。另一种测量方法是把样品旋转 180°而不用把样品取出，这样产生的电压将是原来的 2 倍，则线圈常数将是原来的 1/2。这两种方法在 IEC 60404-14 标准中都有提到。如果样品的开路负载线是已知的，那么通过式(2.6-71)还可以计算出开路磁感应强度 B_0。

$$B_0=\frac{B/H}{B/H+1}4\pi M_0 \qquad (2.6\text{-}71)$$

式中：B/H 是负载线值。

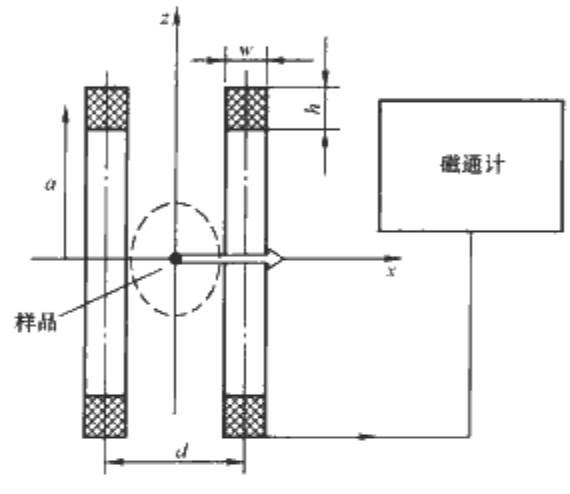


图 2.6-18　亥姆霍兹线圈开路测量示意图

亥姆霍兹线圈对于样品在 x 轴的磁矩分量敏感。如果样品的磁极化强度方向并非平行于 x 轴方向(但具有其固定方向)，在测量过 x 轴分量后，应将样品两次旋转 90°后，分别测量样品磁极化强度在 y 轴和 z 轴上的分量。

弧形稀土永磁样品在电机应用方面非常常见，对于这类沿径向磁化的样品需要采取特殊的测量、计算方法。我们假设一弧形样品为 2α 弧度，体积为 V，且足够的薄，能够认为其各部分磁化强度均匀，将其放置于亥姆霍兹线圈的中心位置，放置时，以 x 轴将样品对称等分为二，设 M 为弧形样品的磁极化强度，则按照弧度将样品划分为无数小区域，则每个区域的磁极化强度 x 轴分量为：

$$\mathrm{d}m_x=MV(\cos\alpha/2\alpha_0)\mathrm{d}\alpha \qquad (2.6\text{-}72)$$

从 $-\alpha$ 到 $+\alpha$ 对样品的 m_x 进行积分，有：

$$m_x=MV(\sin\alpha_0/\alpha_0) \qquad (2.6\text{-}73)$$

如果整个样品处于均匀区，即 k_x 为常数(k_x 称为亥姆霍兹均匀区的线圈常数)，m_x 就可以直接用提拉样品法测出，根据式(2.6-70)，弧形样品的磁极化强度的计算公式为：

$$M=\frac{m_x}{V}\frac{\alpha_0}{\sin\alpha_0} \qquad (2.6\text{-}74)$$

外磁场的变化能够显著影响亥姆霍兹线圈的测量，应该尽量避免这一因素，如不可避免，也可采用一个具有相同匝面积的线圈与该亥姆霍兹线圈串联反接，值得注意的是：该线圈完全不与样品耦合，从而可以抵消外磁场的干扰。此外，还可以采用屏蔽的方法将亥姆霍兹线圈罩住，仅留一个

用于提拉样品的小口，以避免外界磁场的影响。然而，这样做无疑使从样品出来的磁力线也受到影响，此时，亥姆霍兹线圈已不是前述的绝对测量，这种情况下，必须采用标准样品校准后方能使用，校准是采用同形状、同尺寸的标准永磁样品。

通常情况下，亥姆霍兹线圈测量法的重复性优于0.5%。准确性在1%～2%以内。为使磁通计的漂移最小，建议磁通计应长期通电。而且，由于亥姆霍兹线圈非常灵敏，测量人员身上不得佩戴任何铁磁物体。

3.2.2 提拉样品磁强计

传统的亥姆霍兹线圈磁矩测量法仅能确定退磁曲线上的某一点，然而近来基于亥姆霍兹线圈的动态测量技术，使之能够得出样品磁极化强度随外加磁场变化的关系。

如图 2.6-19(a)所示，将两个同样的亥姆霍兹线圈串联反接，并沿两线圈共有的 x 轴放置。初始状态样品置于线圈 1 的中心点，其所对应的磁通为 Φ_1，而线圈 2 此时完全不与样品的磁力线耦合。然后快速将样品提拉至线圈 2。因为此线圈与线圈 1 串联反接并且没有任何漏磁与线圈 1 耦合，此时线圈 2 对应的磁通为 $-\Phi_1$。磁通变化了 $\Delta\Phi=2\Phi_1$。如果 k_x 为两线圈的线圈常数，m_x 为样品的磁矩，与亥姆霍兹线圈连接的积分器所显示的磁通变化量则为：

$$\Delta\Phi = 2k_x m_x \tag{2.6-75}$$

如图 2.6-19(a)所示，由螺线管在亥姆霍兹线圈外施加外磁场 H_a，通过缓慢变化 H_a，即能够获得样品的磁极化强度 $J=\mu_0(m_x/V)$ 随外磁场变化的函数关系，这种装置被称为提拉样品磁强计。样品中的有效磁场 H_e 可以通过扣除退磁场获得，从而能够得到磁滞回线、磁化曲线等。改变线圈设计，电磁铁也可以作为外磁场源，然而，镜像效应会显著影响测试结果。因此，对于使用电磁铁的提拉样品磁强计，必要的数据补偿处理以及标准样品定标是需要考虑的。如果要完成对高矫顽力稀土永磁材料的测试，必须引入超导线圈以获得更高的磁场。

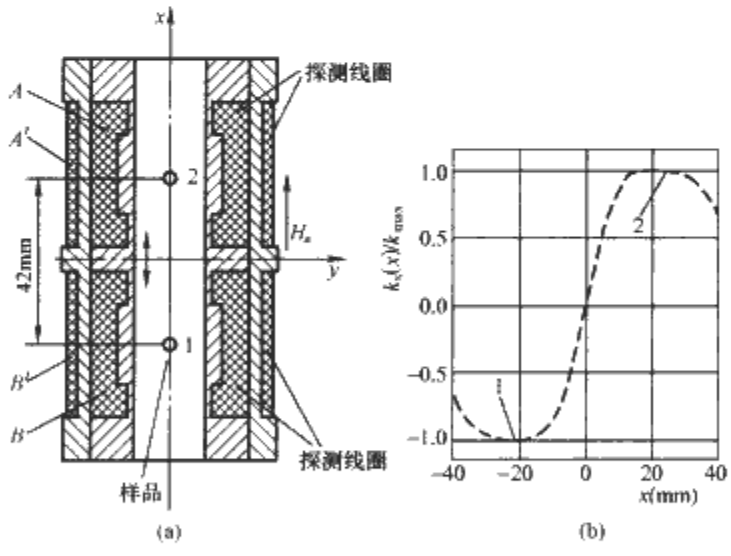


图 2.6-19 提拉样品磁强计的垂直轴向线圈及其变化曲线
(a)提拉样品磁强计的垂直轴向测试线圈；
(b)不同位置的线圈常数变化曲线

图 2.6-19(a)中样品磁矩的测量是通过一段经约 42mm (约耗时 0.5s)距离的提拉动作实现的，该装置配备了超导螺线管线圈，图 2.6-19(b)中可以看出，亥姆霍兹线圈的常数 k_x 在位置 1 和位置 2 处为一平坦的极大值区，这表明亥姆霍兹线圈准确度不依赖于 1、2 处样品位置的摆放，因此被测样品的尺寸可以相应的拓宽。必须指出的是线圈 1 和线圈 2 位串联反接，这一做法可以有效的抵消外磁场的信号。实际上，这种做法在这里仍不能补偿因为样品机械振动导致的影响，而这种振动在高达 8T 的外磁场作用下是必然会发生的。

为了解决这一问题，每个线圈还可以做成里外两层[$A-A'$和$B-B'$如图 2.6-19(a)所示]，两层具有相等的匝面积且串联反接，这样做可以有效控制振动带来的噪声。不难理解，外层的线圈具有较少的匝数，大约与内层线圈直径的平方成反比。因此这样的设计使外层线圈的线圈常数 k_x 非常低，在磁矩测试过程中，对样品磁通的抵消非常小。

图 2.6-19(a)所示的双线圈提拉样品磁强计采用超导线圈提供磁场，最高磁场为±8T。安装温度控制系统后，可以在 1.5～400K 的温度范围内进行测量。灵敏度约为 10^{-7} Am^2，虽然低于 VSM，但它测量精度高，可靠性好，还可以测量霍尔系数，尤其在小块硬磁体的测量领域发挥着重要的作用。

除此以外，只需配备锁相放大器和重新设计使样品变为振动模式，提拉样品磁强计也可以改为振动样品磁强计的方式测量。可以预计提拉样品磁强计在薄膜，记录介质，以及各种人工结构、弱磁体磁性能测量方面将来也会得到广泛的应用。

3.3 交变梯度磁强计(AGFM)

科技的不断发展，使仪器的小型化渐成趋势；再加上各种具有弱磁性的人工结构不断涌现，都使得人们对测量灵敏度提出了更高的要求。前面介绍的振动样品磁强计(VSM)正是解决这一问题的常用仪器，其测量灵敏度达到了 10^{-8}～10^{-9} Am^2。

如果被测样品的磁矩更低，甚至低于 VSM 的噪声水平。例如一个 5μm 的弱磁样品小颗粒，其磁矩约为 5×10^{-11} Am^2，VSM 将对此无能为力。要测量这样的样品，只能诉诸于超导量子磁强计(SQUID)或交变梯度磁强计(Alternating Gradient Force Magnetometer，简称 AGFM)，前者较为常见，但高昂的运行费用和极长的测量时间都限制了其应有的应用。AGFM 是一种较为新颖的开磁路测量方法，它提供了一种经济、快速的选择。AGFM 实际上也是磁秤法的一种，与其他磁秤法仪器一样，它通过测量磁性样品在非均匀磁场中的受力，来确定其磁矩，具有很高的灵敏度。

3.3.1 交变梯度磁强计的原理

简单的说，AGFM 是 VSM 原理的反方向应用：假如对 VSM 的探测线圈通以交流电流，则若干对称的线圈将会在其间隙处产生一个周期性交变的非均匀磁场 H。如将一个磁矩为 m 的样品置于此间隙，磁体将受到一个使其振动的磁力，通过测量样品移动的距离即可以测量此力的大小。如果样品可以看做偶极子，则在交变磁场 H 的作用下，该力可以写做：

$$F = \nabla(m\mu_0 H) \tag{2.6-76}$$

选择一个简单的情况予以说明，仍以图 2.6-15(a)所示的线圈系统为例，磁矩为 m 的偶极子位于中心处，样品磁矩平行于 x 轴，则样品受到的力：

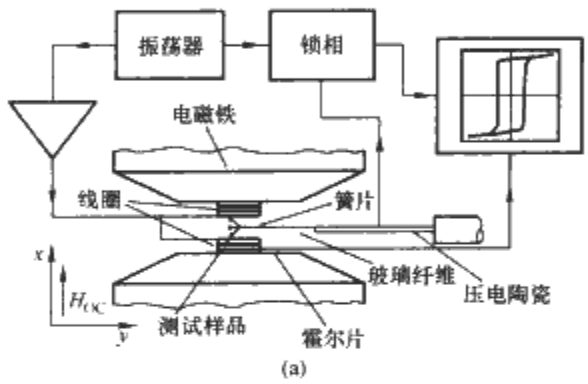
$$F = F_x = \mu_0 m\frac{\partial H_x}{\partial x} \tag{2.6-77}$$

由于两线圈对称，在(y，z)平面上 $F_y=\mu_0 m(\partial H_x/\partial y)$，$F_z=\mu_0 m(\partial H_x/\partial z)$均为零。当一个正弦交流电流 $i(t)=i_0\sin\omega t$ 通过探测线圈时，样品将受到一个周期性交变的力 $F_x(t)=F_0\sin\omega t$ 使其振动，由于此振动是位于线圈结构的中心处的小幅振动，根据式(2.6-62)$F_0=mg_x(0)i_0$，$g_x(0)$仍是线圈鞍点的灵敏函数。因此只要精确控制线圈中正弦电流的频率和振幅，则

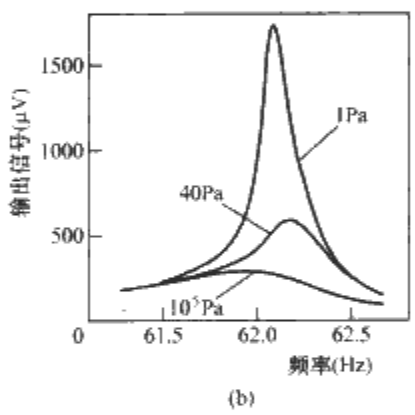
样品受到的力将与样品的磁矩成正比。

3.3.2　交变梯度磁强计的结构和使用

图2.6-20 所示为一套 AGFM 装置。外磁场由电磁铁提供，在两个电磁铁极头上对称地放置两个串联反接的梯度线圈。样品置于一根金线制成的簧片(直径 18μm，长 10mm)的顶端，此簧片位于两个线圈的中心，线圈间距 2mm 并通以交流信号，当线圈产生交变磁场时，样品将受力沿 x 轴方向振动。其振动信号通过力传感器——双压电晶片(20mm×1.5mm×0.5mm)转换为电信号，该晶片与金线簧片通过玻璃纤维(长 70mm，直径 150μm)相连。双压电晶片的输出电压信号与样品的磁矩成正比，霍尔探针记录缓慢变化的外磁场，因此可以得到被测样品的磁滞回线。为了提高信噪比，梯度磁场的频率与簧片的机械共振频率应相同，约为数百赫兹，锁相放大器则在相同频率上检测测试信号。



(a)



(b)

图 2.6-20　AGFM 套管装置图

(a)AGFM 的示意图；(b)双晶电压片输出信号随着振动系统所处气体的压强降低而明显增大

AGFM 的灵敏度与共振系统的品质因子 Q 有关，品质因子定义为：$x_0 = x_{DC}Q$。其中 x_0 为一个处于簧片顶端的样品在交变场的作用下做简谐振动时，共振系统得到的最大振幅，x_{DC} 为将同一样品和簧片放入一个最大磁力与前者(交变场)相同的静态场下，簧片顶端的偏移量。在图 2.6-20 所示系统中，Q 与共振系统周围的气体有关，如果将簧片等传感器件密闭并抽真空，Q 值将会大幅提高。如图 2.6-20(b)所示，在真空状态(1Pa)Q=550，此时 AGFM 的磁矩灵敏度可以达到$10^{-13}\,Am^2$ 量级。此外，由于样品的尺寸为微米量级，双压电晶片得到的磁矩信号中由金线带来的影响变得不可忽略，该影响为反方向，必须从结果中扣除。

目前，AGFM 的测量温度范围通常在：10～673K。但必须指出，交变梯度磁强计具有很高的室温灵敏度，但高、低温下的测试灵敏度与室温相比有很大差距，一般只有$10^{-8}\,Am^2$。此外，对于矫顽力非常低的材料，梯度线圈在样品上产生的交变磁场有可能改变磁滞回线的形状，影响测试结果的准确性。因此低矫顽力材料在测量过程中应牺牲一定的测试灵敏度，选用较低的磁场梯度。

由于 AGFM 磁场采用电磁铁，其最大磁场只能达到 2T，但是由于测量速度快，灵敏度高，测量数据点多，所以在薄膜、纳米、弱磁性等材料的室温测量方面能够得到良好的应用。

3.3.3　交变梯度磁强计的校准

开路测量系统中常用的已知磁矩标样校准的方法并不适合于 AGFM。这是由于将测试样品取下并换上标样后，标准样品与簧片的连接并不能做到与之前被测样品与簧片的连接完全相同。正确的校准方法是：用核磁共振校准并得到一个小线圈的匝数和面积(NA)，在此线圈中准确通入直流电流 i。将此线圈环绕样品，做到线圈的平面与磁场梯度方向正交，然后，逐步控制并升高线圈中的电流 i，直到样品的磁矩测试结果显示为零。则此样品的磁矩 $m=NAi$。当然这种校准方法也有缺点。如线圈"增加"了样品的质量；而且如果铜线圈不纯，将含有磁性杂质，都会对校准产生影响。

3.4　脉冲磁场测量仪(PFM)

现代稀土永磁工业已可以生产出大量用于永磁电机的高矫顽力磁体。例如 EH 牌号的永磁体其内禀矫顽力大于 2387kA/m，甚至大于 3183kA/m，采用电磁铁作为磁化机构的普通磁滞回线仪对 EH 以上牌号磁体无法进行常温测量。普通磁滞回线仪由于在高场下，电磁铁极头处于饱和状态，被测样品和被测磁场区域已经不是均匀区，因此导致高矫顽力磁体的 H_{cJ}、$(BH)_{max}$ 等测量结果偏低或无法测量。另外，对于科学研究而言永磁材料的很多特性，如饱和磁化强度 M_s 等，可以通过测定饱和磁滞回线来确定，然而对于高矫顽力纳米复合永磁材料而言，无论是确定 M_s 还是饱和磁滞回线都不是一件容易的事。为准确测定 M_s，磁化场必须远高于材料中硬磁性相的磁晶各向异性场。这意味着外磁化场的强度在 10～15T 是必要的。

具备超导磁化装置的 VSM 可以产生 8～10T 的场强，目前大多采用该手段解决以上问题。然而其缺点在于线圈需要液氦冷却，高昂的一次性购置投入和后期维护费用桎梏了其应用范围；另外，VSM 的测试时间通常都需要超过 10min，使之难以适应工业化的质量控制。

自从 20 世纪 80 年代开始，脉冲磁场测试技术(PFM)吸引了一些国家研究者的注意。使用脉冲磁场获得 20～30T 高场的成本，远远低于超导磁化装置获得 5T 磁场所需的费用。PFM 可以施加无限高的外磁场。这使得任何类型的永磁体都可以轻易地获得其常温磁性能表征，不必担心高的内禀矫顽力会限制测试进程。且 PFM 技术是一种特别快速的永磁体检测方法。线圈中的脉冲放电及信号获取时间仅为数十到数百毫秒；加上样品装载和后期数据处理时间，单次测试可以在数十秒内完成。此外，PFM 技术不涉及到具有非线性效应的软磁铁心材料，其测试重复性具有明显的优势，利用 PFM 能够有效地解决现代高矫顽力稀土永磁材料的饱和磁化、常温测量和测量准确性问题。

由于 PFM 采用开路样品，又是瞬间动态测量，尤其是涡流效应的影响使其进展不是很快。目前德国的 Dresden 实验室拥有国际最为领先的脉冲磁场发生装置，英国、美国、日本、韩国、奥地利等国研究机构都已建立了自身的脉冲磁场测试技术的研究体系。由于脉冲磁场测量仪的测试时间短，对样品无损、不接触样品，不限制任何形状的工业样品，使其适合于高速率检测大量的永磁体。这一优势使之在工业质量控制方面有重要的应用前景。目前英国的 Hirst 公司已经开始将初步的工业产品推向市场，其发展的脉冲磁场工业测试装置实现了直径 30mm，高度 25mm 的大块稀土材

料的在线质量控制。

除上述应用以外，PFM 还具有另一项独特的优势——奇点探测法(SPD)测量永磁材料各向异性常数。奇点探测法是指在单晶的难磁化曲线方向上，取磁化强度 M 对磁化场 H 的 n 阶导数 d^nM/dH^n 时，在靠近各向异性场附近会出现奇异点，即 d^nM/dH^n 的峰值。在实际测量中，d^nM/dH^n 是通过 d^nM/dt^n 测量的，PFM 直接得到的是磁化强度对时间的函数，可以在信号探测器后端继续添置微分器实现 d^nM/dt^n 的测量。这使 PFM 技术在多晶奇点探测法(SPD)测试材料的各向异性场方面具有特殊的优势。

3.4.1 脉冲磁场测量仪原理

脉冲磁场测量仪的原理是用一个高能电容器或电容器组向中空的磁化线圈脉冲放电，用以获得 10T 甚至 100T 的瞬间强磁场，记录此磁场及材料的磁极化强度变化，即可得到该材料的饱和磁滞回线。

脉冲磁场测量仪的基本原理如图 2.6-21 所示，它由脉冲磁场发生装置、磁极化强度(J)和磁场强度(H)的感应线圈以及数据处理系统等构成，电容的放电由一只晶闸管控制。

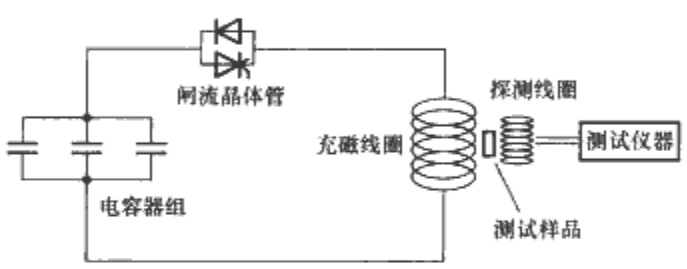


图 2.6-21 脉冲磁场测量仪的结构示意图

脉冲磁场测量仪的关键技术主要包括脉冲磁场发生电路的设计、J 感应线圈的设计、自退磁因子修正和涡流效应的修正以及系统的校准等。下面对其分别介绍。

3.4.1.1 脉冲磁场发生装置

(1) 电容器：电容器是脉冲磁场发生电路的储能器件。通常电容器的最大充电电压不应大于 3000V，这样只用一只晶体闸流管即可完成对其放电的开关控制。对于后面提到的涡流效应而言，脉冲持续时间越长，涡流越小，然而无限度的增大脉冲时间会提高电容器储能要求、增加成本。PFM 采用的电容器一般为金属膜介质，反向电压优于 90%，高寿命。

对于电容器上所加电压而言，仅当零点校正时会关心其是否准确，实际上只要足够使磁体磁化饱和，其重复性不需要非常好，偏差 1%的电容电压重复性就足够了。

(2) 脉冲充磁线圈：给定电容器储能，脉冲线圈的电感决定了脉冲宽度。为了获得磁体整周期的磁滞回线，脉冲电流的衰减要足够低，因此线圈电阻应尽可能的小。PFM 设备的脉冲线圈设计还要考虑到涡流效应的校正，通常的做法是将线圈分为两部分，这两部分可以独立地产生两个磁场用以磁化磁体，即长脉冲 f 和短脉冲 $2f$，或者直接使用两个具有不同脉冲时间的线圈达到这一目的。线圈的尺寸（直径、均匀性）决定了所测磁体的大小，为了使磁体和测试线圈都位于充磁线圈内的均匀区，充磁线圈的长径一般大于 5。

(3) 脉冲磁场发生电路：脉冲磁场发生电路的设计方法可以有多种，如图 2.6-22(a)所示为全正弦波衰减电路，电路中电流 $I(t)$决定了磁场强度的大小，该值可表示为：

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\beta t} \sin\omega t \qquad (2.6\text{-}78)$$

式中：$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$；$\beta = R/2L$。

由于线圈必然会产生阻抗损失，所以反向磁场的峰值会有明显的减少，衰减因数 β 决定了峰值的改变量。因此，正向磁场应足够大以获得足够大的反向磁场。采用全正弦波函数脉冲放电有利于正向与反向测量过程的同时进行，避免了曲线不连续的问题。这对于需要涡流修正的导电磁体而言尤为重要。

图 2.6-23 为该电路典型的放电波形。通常限制该正弦波衰减波形在 360°以内，即当正向半周期电流通过晶闸管后，该晶闸管即关断，所以反向电流只能通过二极管传导。放电周期内线圈耗散以外的电能将重新储备于电容器组，供第二次放电使用。

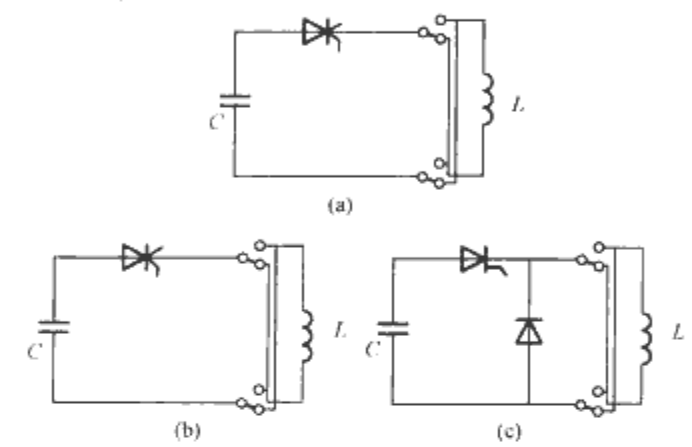


图 2.6-22 脉冲磁场发生电路示意图

(a) 正弦波衰减电路；(b) 单向 1/2 正弦波电路；(c) 单向衰减电路

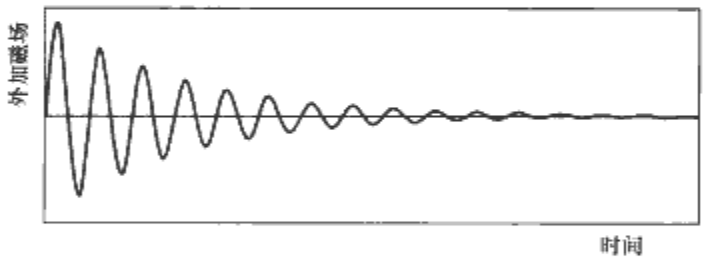


图 2.6-23 正弦波衰减电流（及磁场）波形

图 2.6-22 (b) 所显示的电路为日本电工材料协会标准(EMAS) 中规定的电路。其电流表达式与式 (2.6-78) 相同，然而当第一个半脉冲过后，由于晶体闸流管的作用，反向充电电压不能释放。其结果得到了正弦波半波电流 (0°～180°)。如果在反向施加同样一个半脉冲，则可以同时得到同样满振幅的正、负脉冲磁场。使用这种放电电路，一次测试可以通过电容的两次放电实现，其优点明显，即可以取得同样峰值的正负磁场，然而同时也造成了测试电流的不连续性。

图 2.6-22 (c) 是第三种脉冲磁场发生电路，该电路的目的是为了获得更长的脉宽。其放电电流由下式决定：

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\beta(t-t_0)} \sin\omega t \qquad (2.6\text{-}79)$$

式中：t_0 为开始放电时刻。当电容完全放电后，二极管开始导通并且阻止电流继续对电容充电（反向）。此刻其电流由下式决定：

$$I(t) = I_0 e^{\frac{-R(t_1+t)}{L}} \qquad (2.6\text{-}80)$$

式中：t_1、I_0 分别为 $U_0 = 0$ 时的时刻和钳位二极管开始变得正向导通时的电流。和第二种电路一样，完成测试，必须施加两次相反的脉冲以获得一个正向的和一个反向的脉冲磁场周期。不同之处是该电路响应的电流波形在上升沿和下降

沿不同，峰值以后的磁场变化变得非常缓慢。

3.4.1.2　测试线圈

脉冲磁场测量仪的测试系统主要由测试线圈组成（包括 J 和 H 线圈）。相比较而言，H 线圈容易设计，其位置应该靠近测试样品，但是不能近到受到样品磁通的影响。H 线圈可以放在 J 线圈内。J 线圈由于须考虑到空气磁通的补偿以及对样品位置的不敏感性等问题变得较为复杂。通常有如图 2.6-24 所示三种 J 线圈设计方法。它们都由串联反接的两个（或多个）线圈组成。为了仅获取磁极化强度的信息而将外磁场的信息扣除，这些线圈具有相同的匝面积乘积及与样品不同的耦合程度。在测试过程中，J 线圈中由于有样品存在，磁通会随着磁场的变化而不断变化。其输出电压是磁通随时间的变化，该信号绝大部分来自于样品的磁极化强度，同时也包括零点信号和涡流影响等。

如果测试样品很薄，如盘片常采用“$n+n$”测试线圈，如图 2.6-24（a）所示。但是“$n+n$”线圈对于 H 线圈的位置偏移非常敏感，脉冲发生时的振动都有可能影响它，因此，补偿线圈常被分成两个，如图 2.6-24（b）所示，对称地分布在测试线圈两侧，即 N/2↓ −N↑ −N/2↓ 线圈。

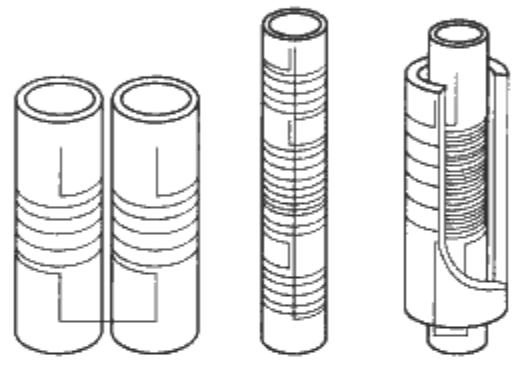


图 2.6-24　J 感应线圈模型

（a）$n+n$ 线圈；（b）同轴 N/2↓ −N↑ −N/2↓ 线圈；（c）同轴线圈

Eckert 等人在图 2.6-24（c）所示同轴 J 线圈的基础上设计了经典的同轴双线圈系统，各国的 PFM 实验系统中，多采用这种设计方法。如图 2.6-25 所示，补偿线圈两匝之间的轴向距离为测试线圈该值的两倍，因此，该线圈测试线圈直径 6.8mm，长度 12.8mm，182 匝，补偿线圈直径 11.0mm，长度 9.3mm，68 匝。补偿线圈 b 直接与测试线圈反向绕制，补偿线圈 c 用来获得高精度的补偿。

使用该线圈，当直径 4.3mm 的球形样品在轴向偏离 ±2mm时，所测结果仅在 0.2%偏差范围内改变。

补偿线圈 c 的作用是为了通过电路补偿，将测试线圈与补偿线圈之间的匝面积之差减小到最低。该线圈还考虑到了温度对零点的影响，这一部分信号通过温度校准过的电位计来测试或补偿。排除以上因素后，零点信号仍不为零。这是由其他原因，如磁场线圈等造成的，都可以通过实测的方法确定并扣除，这就需要在测试过磁体的极化强度以后，再在同等条件下测试一次没有样品时的磁极化强度信号。同轴测试线圈对于振动的敏感性极小，但是要获得很好的补偿，其设计较前两者复杂很多。

3.4.2　脉冲磁场测量仪数据处理技术

3.4.2.1　自退磁因子修正

PFM 为开磁路。为了得到真实的样品磁性能，应用自退磁因子（N_d）对所测结果校正是非常重要的（如图 2.6-26所示）。永磁材料的测试过程中，剩磁以及最大磁能

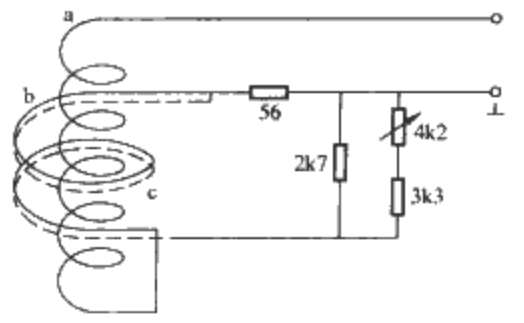


图 2.6-25　Eckert 等人设计的磁极化强度测试装置

a—测试线圈；b—补偿线圈；c—精细补偿线圈

积等都强烈地依赖于 N_d。而自退磁因子依赖于试样的几何外形、材料的磁导率等。

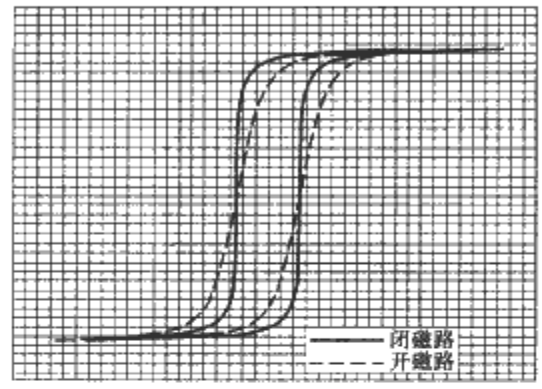


图 2.6-26　自退磁因子的修正

对于简单的形状，如球体或椭球，可以很轻易地获得其 N_d，然而工业磁体多为圆柱形或矩形块体，要计算这些形状的退磁因子是一件困难的事，往往需要应用有限元软件计算退磁杂散场。

为处理自退磁因子的问题，EMAS 规定仅采用有限的几种几何外形，用以减少由自退磁因子校正、涡流校正等带来的误差，从而提高测试的重复性。当把样品限定为某一特定形状，那么所有测试都可以采用同一个自退磁因子值了。Hirst 生产的 PFM 允许很大范围的形状和尺寸，在得到最终结果之前将由此带来的所有自退磁因子、涡流、热效应的影响进行处理。

对于圆柱和方块磁体的退磁因子，已有经典的文献论述。但由于自退磁因子 N_d 与磁导率的大小有关，因此 N_d 的选择难度仍然很高。对于 PFM 而言，必须考虑到两种不同的自退磁因子——N_m 与 N_f，其中 N_m 是相对于整个磁体的平均磁化强度而言的自退磁因子，适合应用于小块磁体的磁性能测量；N_f 是基于磁体中间面的平均磁化强度而言的自退磁因子，适合于大块磁体而测试线圈相对较短的测试情况，采用这两种自退磁因子计算结果时，应根据需要选用。

3.4.2.2　“$f-2f$”法涡流效应修正

NdFeB、SmCo 等稀土永磁材料均为导体，将它们置入脉冲磁场中，将会在其内部产生涡流效应。这些涡流反过来将会产生感应磁场，影响永磁体的测量。如何处理涡流效应，一直是脉冲磁场测量仪的设计及提高其测试准确性的重要问题。

最初的脉冲磁场测量仪采用脉宽很大的脉冲及尺寸很小的样品，这样就能使涡流效应的影响减弱到可以忽略不计的程度，目前日本电工材料协会的标准中仍规定了这种方法。实际设计 PFM 时，增大脉冲宽度固然可以使涡流小到可以忽略的程度，然而任何不必要的脉冲持续时间，尤其是对于大块磁体，都会极大地提高对电容器的储能要求，这势必使

制造 PFM 的成本成倍地提高。因而，必须发展一种能够计算出涡流影响的校正方法。

计算涡流影响的方法被称为“$f-2f$”法。该法采用双脉冲测试，即用两个振幅相同而频率不同的脉冲分别向线圈放电，产生磁场。测试时为保证双脉冲具有可比性，所测磁体的初始状态必须一致，即同为完全退磁或完全饱和充磁。

如图 2.6-27 所示的被测样品，假设该样品具有单值磁导率 μ_o，且已被反向完全饱和充磁。磁体自退磁场 H_d 将决定于磁极化强度和磁体形状。当线圈中施加一正向磁场 H_a，磁体中将会产生涡流并随之带来磁场 H_e，该磁场反向于外加磁场。这些磁场共同作用下的磁体，其净磁场 H_m 可表示为：

$$H_m = H_a - H_e + H_d = H_a - H_e - \frac{N_m J_m}{\mu_o} \tag{2.6-81}$$

式中：N_m 为整个磁体的平均自退磁因子。

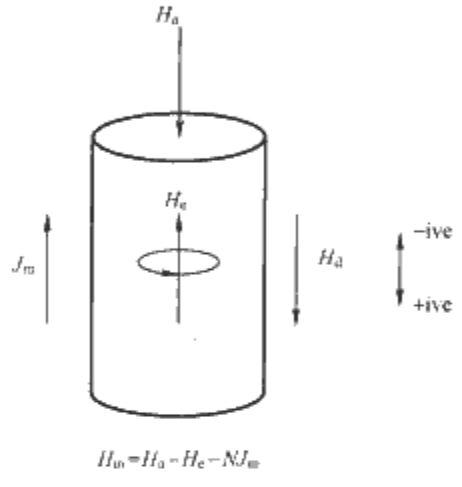


图 2.6-27 脉冲磁场下磁体所受各磁场方向示意图

如果忽略磁滞影响，J 感应线圈探测到的磁极化强度 J_c，包含两部分贡献：在普通测量磁滞回线中 H_m 对应的 J_m，以及由涡流效应产生的表观磁极化强度 J_e。

由上述条件可以看出，当施加给磁体的净磁场相同时，有下式成立：

$$H_{as} + \frac{J_{cs}}{\mu_o} = H_{al} + \frac{J_{cl}}{\mu_o} \tag{2.6-82}$$

这里下标 s 和 l 分别代表短脉冲和长脉冲。这样只有满足上式，在长脉冲和短脉冲下磁体内的静磁场才能相等，测量中材料整个磁滞回线所采的数据点才能匹配。因此，这种方法所加的两个外磁场大小并不相同。给定测试时间，并给定与之相对应的数据点，则长脉冲与短脉冲下磁体内净磁场的变化率比值（并不是两者脉宽的比值）就能轻易得出来。

由于涡流直接与磁体内净磁场的变化率呈正比，只要有了上述净磁场变化率的比值，则两次测量涡流引起的磁极化强度和磁体的真实磁极化强度就可以计算出来。

图 2.6-28 显示了 $f/2f$ 法涡流影响的消除过程，其中包括两条不同频率脉冲测量所得的结果，以及经涡流校正后的曲线。涡流的影响使得测试所得 JH 曲线看起来“膨胀”了许多，因此所测内禀矫顽力和剩磁的值都比真实值偏高。而且脉冲频率越高这种效应越明显。从图 2.6-28 可以看出短波长的曲线具有最大的表观内禀矫顽力，涡流校正后的曲线明显显示了较低的内禀矫顽力。

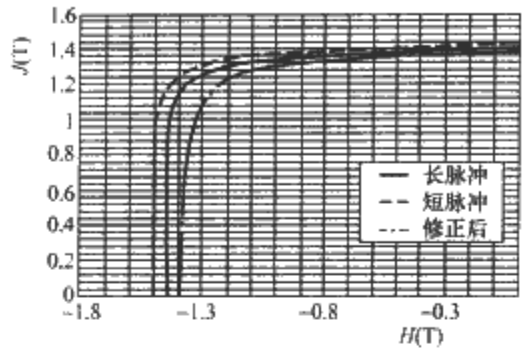


图 2.6-28 $f/2f$ 法涡流修正

3.4.3 脉冲磁场测量仪系统校准

3.4.3.1 H 校准

（1）核磁共振（NMR）法校准。核磁共振法是磁场校准优先采用的方法。Grossinger 等人用一个经 NMR 测量已知匝面积的小线圈（直径 3mm，高 0.1mm）校准 PFM 产生的磁场。感应电压如式（2.6-84）所示，由此不仅能获得磁场强度而且还可以得到衰减因数 β 和脉宽 ω。

$$H = H_o \exp(-\beta t) \cdot \sin\omega t \tag{2.6-83}$$

$$\begin{aligned} u_i(t) &= -NA\mathrm{d}B/\mathrm{d}t \\ &= -NA\mu_o H_o(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)[\exp(-\beta t)\sin\omega t] \end{aligned} \tag{2.6-84}$$

（2）SPD 法校准。通过 SPD 法测量钡铁氧体的各向异性场（$H_A = 1.65$T）也是一种磁场校准的方法，这是由于钡铁氧体的 H_A 在室温下的变化非常小，而 PFM 使用 SPD 法测量其 H_A 又非常简便。然而由于自退磁场的影响，使这种方法具有了很大的不确定度，并且 H_A 在一定程度上依赖于温度，因此限制了这种方法的应用。

（3）MnF_2 单晶校准。Eckert 等人采用 MnF_2 单晶体的变磁性转变点来校准磁场。4.2K 时 MnF_2 单晶在 9.3T 处有一磁性转变斜率最大值，用这一磁场强度可以对 PFM 进行 H 通道的校准，包括磁场测试线圈、积分器等的准确度都由此决定。MnF_2 单晶的变磁性转变斜率最大值磁场强度可以由具备超导线圈的磁强计测定。

3.4.3.2 J 校准

（1）镍标样校准。镍标样经常用来校准磁测设备的磁化强度数值。然而在脉冲磁场下，涡流效应限制了这一方法的使用。为了解决这一问题，可以采用有限元方法去除涡流的影响，但更多的是采用实验的方法，将尺寸、形状都相同的铜试样置于相同的脉冲磁场下。镍标样的磁化强度数值扣除铜试样产生的磁矩即得到所需真值，该方法考虑到了两者电导率不同产生的影响。

（2）软磁铁氧体校准。磁矩已知的软磁铁氧体也可以用来校准磁化强度，由于是非金属材料，避免了涡流的产生。其缺点是居里温度太低，温度对磁矩的影响较为明显。

参 考 文 献

[1] 姜寿亭，李卫编著. 凝聚态磁性物理. 北京：科学出版社，2003.

[2] 周寿增，董清飞著. 超强永磁体——稀土铁系永磁材料. 第2版. 北京：冶金工业出版社，2004.

[3] 田民波编著. 磁性材料. 北京：清华大学出版社，2001.

[4] K. H. J. Buschow. Handbook of Magnetic Materials, Vol 10. Amsterdam : North-Hollland:: Elsevier, 1997.

[5] 周寿增 等 编著. 稀土永磁材料及其应用. 北京：冶金工业出版社，1990.

[6] Б. В. Молотилов 主编. 简光沂译. 精密合金手册. 北京：北京冶金研究所，1975.

[7] Luo Yang, Li Wei, Proceedings of 19th International Workshop on Rare Earth Permanent Magnets & Their Applications, Beijing, China, August 30-Sep 2, 2006.

[8] David Brown, Bao-Min Ma, Zhongmin Chen, Developments in the processing and properties of NdFeB-type permanent magnets, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 248 (2002) 432.

[9] Pecharsky V K and Gschneidner K A Jr, J Magn. Magn. Mater. (1999) 200 44.

[10] Gschneidner K A Jr and Pecharsky V K, Annu. Rev. Mater. Sci. (2000) 30 387.

[11] Tishin A M, Hand book of Magnetic Materials, vol. 12, ed K H J Buschow (Amsterdam: Elsevier), p. 395.

[12] Tshin A M and Spichkin Y I. The Magnetocaloric Effect and its Applications(Bristol: Institute of Physics Publishing), 2003.

[13] 鲍雨梅，张康达. 磁制冷技术. 化学工业出版社，2004.

[14] Gschneidner K A Jr and Pecharsky V K and Tsokol A O, Recent developments in magnetocaloric materials, Rep. Prog. Phys. 68 1479-1539, 2005.

[15] Nelson J A, Bennett L H and Wagner M J, J. Am. Chem. Soc., 124 2979, 2002.

[16] Shir F, Yanik L, Bennet L H, Torre E D and Shull R D, J. Appl. Phys., 93 8295, 2003.

[17] Lee S J and Jiles D C, IEEE Trans. Magn., 36 3105, 2000.

[18] Tang Y B, Chen Y G, Teng B H, Fu H, Li H X and Tu M J, IEEE Trans. Magn., 40 1597, 2004.

[19] Xu X N, Lu D W, Yuan G Q, Han Y S and Jin X, J. Appl. Phys., 95 6302, 2004.

[20] G. Engdahl(Ed.), Handbook of giant magnetostrictive materials, Academic Press, San Diego, CA, 2000.

[21] Mechanical and magnetic properties of a novel polymer infiltrated directionally solidified RE-Fe giant magnetostrictive materials, IEEE Trans. Magn., Vol. 40, No. 4, July 2004.

[22] M. Anjanappa and Y. Wu, Magnetostrictive particulate actuators: configuration, modeling and characterization, Smart Mater. Struct., 6: 393-402, 1997.

[23] H. Uchida, Y. Matsumura, H. Kaneko, Progress in thin films of giant magnetostrictive alloys, J. Magn. Magn. Mate., 239: 540-545, 2002.

[24] A. Ludwig and E. Quandt, Giant magnetostrictive thin films for applications in microelectromechanical systems, J. Appl. Phys., Vol. 87, No. 9, May 2000.

[25] Jonathan D. Snodgrass, O. D. McMasters, Optimized TERFENOL-D manufacturing processes, J. Alloys Comp., 258: 24-29, 1997.

[26] E. Quandt and A. Ludwig, Giant magnetostrictive multilayers, J. Appl. Phys., Vol. 85, No. 8, April 1999.

[27] J. B. Restorff, M. Wun-Fogle and A. E. Clark, Temperature and stress dependence of the magnetostriction in ternary and quaternary Terfernol alloys, In U. S. Navy Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices, State College, PA, 13-15, April 1999.

[28] R. Tickle, R. D. James, T. Shield, M. Wuttig and V. V. Kokorin, Ferromagnetic shape memory in NiMnGa system, IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, 4302-4310, September 2004.

[29] R. C. O, Handley, Model for strain and magnetization in magnetic shape-memory alloys, J. Appl. Phys., Vol. 83, No. 6, 3263-3270, March 1998.

[30] D. C. Jiles, Introduction to magnetism and magnetic materials, Chapman&Hall, London, Second Edition, 1998.

[31] Oh Yeoul Kwon, Yong Dong Kwon, Do Hyun Kim, Jong Chul Kim and Zin Hyoung Lee, Mechanical and magnetic properties of a novel polymer infiltrated directionally solidified RE-Fe giant magnetostrictive materials, IEEE Trans. Magn., Vol. 40, No. 4, July 2004.

[32] M. J. Dapino, F. T. Calkins and A. B. Flatau, Magnetostrictive device, In 22nd encyclopedia of electrical and electronics engineering, Vol. 12, pp. 278-305, Ed. J. G. Webster, John Wiley&Sons. Inc., 1999.

[33] R. Venkataraman, W. P. Dayawansa and P. S. Krishnaprassad, The hybrid motor prototype: design details and demonstration results, Technical report, CDCSS, University of Maryland, College Park, MD, 98-2, 1998.

[34] S. Tsunashima, Magneto-optical recording, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 34, 2001, pp. R87-R102.

[35] Carcia P. F., Meinhaldt A. D. and Suna A., *Appl. Phys. Lett.*, 47, 1985, 178.

[36] J. H. Yin, J. Ding, J. S. Chen and X. S. Miao, Magnetic properties of Co-ferrite thin films prepared by PLD with in situ heating and post-annealing, *J. Magn. Magn. Mater.*, 303, 2006, pp. e387-e391.

[37] Rare-earth-mediated magnetism and magneto-optical Kerr effects in nanocrystalline $CoFeMn_{0.9}RE_{0.1}O_4$ films, Biao Zhou, Ya-Wen Zhang, Chun-Hua Yan, et

al, *J. Magn. Magn. Mater.*, 280, 2004, pp. 327-333.

[38] Terris B. D., Mamin H. J., Ruger D., et al, *Appl. Phys. Lett.*, 65, 1994, 388.

[39] Gangopadhyay S., et al, *J. Appl. Phys.*, 87, 2000, 5407.

[40] Saga H, Nemoto H, Sukeda H and Takahashi M, Magneto-Optical Recording International Symposium, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 23 225.

[41] 姜宏伟. 磁性金属多层膜中的巨磁电阻效应. 物理, 26(9), 562, 1997.

[42] 温艳玲等. 巨磁电阻薄膜材料的研究进展. 上海金属, 27, 56, 2005.

[43] 包丽梅等. 隧道结巨磁电阻材料的研究进展. 硅酸盐学报, 33, 1510, 2005.

[44] 蔡建旺. 磁电子学器件应用原理. 物理学进展, 26, 180, 2006.

[45] R. E. Fontana, et al. IEEE Trans. Magn, 35(2), 806, 1999.

[46] E. Daggoto, Nanoscale phase separation and colossal magnetoresistance, Springer-Verlag, Berlin, 2002.

[47] 焦正宽, 曹光旱. 磁电子学. 浙江大学出版社, 2005. 10.

[48] V. F. Agekyan, Phys. Solid State, 44, 2013, 2002.

[49] I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys., 76, 323-410; 2004.

[50] 王克峰, 刘俊明. 物理学进展, 23, 192, 2003.

[51] 刘俊明, 王克峰. 物理学进展, 25, 82, 2005.

[52] Y. Matsumoto, M. Murakami, T. Shono, T. Hasegawa, T. Fukumura, M. Kawasaki, P. Ahmet, T. Chikyaw, S. Koshihara and H. Koinuma. Science 291 854, 2001.

[53] K. Ueda, H. Tabata, and T. Kawai, Appl. Phys. Lett. 79 988, 2001.

[54] J. He, Shifa Xu, Young K. Yoo, Qizhen Xue, Hyung-Chul Lee, Shifan Cheng, X. -D. Xiang, Ichiro Takeuchi, Appl. Phys. Lett. 86 052503, 2005.

[55] N. Theodoropoulu, A. F. Hebard, M. E. Overberg, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, S. N. G. Chu and R. G. Wilson, Phys. Rev. Lett. 89 107203, 2002.

[56] M. E. Overberg, Materials Research Society Fall Metting, Boston, (2001), J. Vac. Sci. Technol. B 20 969, 2002.

[57] W. Gębicki, J. Strzeszewski, G. Kalmer, T. Szyszko and S. Podsiadlo, Appl. Phys. Lett. 76 3870, 2000.

[58] M. Zajac, R. Dorandziński, J. Gosk, J. szczytko, M. Lefeld-Sosnowska, M. Kamińska, A. Twardowski, M. Palczewska, E. Grzanka and W. Gebicki. Appl. Phys. Lett. 78 1276, 2001.

[59] S. Kuwabara, K. Ishii, S. Haneda, T. Kondo and H. Munekata, Physica E 10 233, (2001); S. Kuwabara, T. Kondo, T. Chikyow, P. Ahmet and H. Munekata, Jpn. J. Appl. Phys. 40 L727, 2001.

[60] T. Sasaki, S. Sonoda, Y. Yamamoto, Ken-ichi Suga, S. Shimizu, K. Kindo and H. Hori, J. Appl. Phys. 91 7911, 2002.

[61] N. Theodoropoulu, A. F. Hebard, M. E. Overberg, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, S. N. G. Chu and R. G. Wilson, Appl. Phys. Lett. 78 3475, 2001.

[62] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, and D. Ferrand, science 287 1019, 2000.

[63] K. Sato, and H. Katayama-Yoshida, Jpn. J. Appl. Phys. 39(Part 2, No. 63), L555, 2000.

[64] K. Sato and H. Katayama-Yoshida, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2 40, L334, 2001.

[65] T. Fukumura, Z. Jin, M. Kawasaki, T. Shono, T. Hasegawa, S. Koshigara and H. Koinuma, Appl. Phys. Lett. 78 858, 2001.

[66] T. Wakano, N. Fujimura, Y. Morinaga, N. Abe, A. Ashida, and T. Ito, Physica C 10 260, 2001.

[67] He, Z. G. Yu, Y. K. Yoo, Q. Z. Xue Hyung-Chul Lee, S. F. Cheng, X. D. Xiang and I. Takeuchi, Room-temperature ferromagnetism in Fe-doped ZnO films, unpublished.

[68] E. Johnston-Halperin, D. Lofgreen, R. K. Kawakami, D. K. Young, L. Coldren, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Phys. Rev. B 65 041306, 2002.

[69] Van Dorpe, P. Z. Liu, W. V. Roy, V. F. Motsnyi, M. Sawicki, G. Borghs and J. De Boeck, "Very high spin polarization in GaAs by injection from a (GaMn)As Zener diode,"preprint, 2003.

[70] B. T. Jonker, U. S. Patent No. 5874749, February 23, 1999.

[71] A. G. Petukhov, A. N. Chantis and D. O. Demchenko, Phys. Rev. Lett. 89 107205, 2002.

[72] A. G. Petukhov, D. O. Demchenko and A. N. Chantis, Phys. Rev. B. 2003.

[73] M. E. Flatté, and G. Vignale, Appl. Phys. Lett. 78 1273, 2001.

[74] I. Žuti ć, J. Fabian and S. Das Sarma, Phys. Rev. Lett. 88 066603, 2002.

[75] J. Fabian, I. Žuti ć and S. D. Sarma, Appl. Phys. Lett. 84 85, 2004.

[76] D. L. Smith, M. Kozhevnikov, E. Y. Lee and V. Narayanamurti, Phys. Rev. B 61 13914, (2000); 108. D. A. Bonnel, Ed., Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy, (Wiley New York) (2001); 109. W. H. Rippard and R. A. Buhrman, Appl. Phys. Lett. 75 1001, (1999) and Phys. Rev. Lett. 84 971, 2000.

第3篇　导体材料及其制品

主编单位：上海电缆研究所
主　　编：黄崇祺

第1章 概 述

1 金属导体

1.1 导体种类

导体按材料可分为下列几种：

铜导体——用得最广泛、历史最悠久，在强电和弱电上都应用。

铜合金导体——适用于既要求有较高的电导率，又要求高强度、高耐热等特殊性能的导体。

铝导体——应用的广泛性和使用量仅次于铜导体，特别在各种电压等级的、量大面广的输、配线路上应用最多，在铝芯电线电缆上作为导电线芯亦有相当多的用量。随着铜的价格暴涨，在以铝节铜的趋向下，对铝导体的使用量将会随之有所增加。

铝合金导体——适用于既要求有较高电导率，又要求高强度、高耐热、重量轻等特殊性能的导体。在架空输电线路上有相当的用量。

双金属导体——由两种金属复合(两种金属具有冶金结合的特征)而成的导体，因此兼有两种金属各自的优点，既用于弱电(利用外层包覆金属的集肤效应)，亦用于强电。随着以铝节铜的新一轮进展，预计双金属导体的用量将会进一步的增长。

镀层导体——是在导体上镀以银或锡(铅锡合金等)或镍或银、镍等的导体。在导体上之所以要施加镀层，其目的在于提高导体的表面性能——抗高温氧化、改善焊接性能或提高防腐能力，隔离导体(基础材料)与绝缘材料接触可能产生不利的化学反应。

超导体——低温超导体在液氦温度下运行，早已获得实际的应用，主要用作超导电磁线(圆线或型线)，用于低温超导磁体等的绕组线圈。高温超导体(在液氮温度下运行)以线或带的型式主要用于高温超导电力电缆的导体或屏蔽层；高温超导变压器、电机和磁体等的绕组线圈。

特种导体——是特种电线电缆用的导体，如音响线一单晶铜、半导体封装用键合线、玻璃膜微细线(具有磁性和导电的功能)。

导体按制品的结构和形状可分为下列几种：

杆——加工导体制品的物质基础之一。

线——按 ISO 1638 定义为：成圈(或盘)供应的拉制的实心产品。

绞线(束线)——由实心股线绞合或束合而成。

型线(材)——包括矩形、异形、空心管和带。

编织线——一般由实心细线按一定规则编织成带状或管状。

换位线——由实心型线经换位绞合而成。

1.2 导体名称

按 GB 2900.10—2001《电工名词术语》对电线电缆名称、组合结构、特性等技术基础名词术语的统一解释，有关导体的名称定义如下。

无镀层导体：不镀覆其他金属的单根或多根金属单线组成的导体。

金属镀层导体：每根金属单线均镀覆其他不同金属或金属合金薄层组成的导体。

镀锡导体：镀覆锡层的金属镀层导体。

金属包覆导体：由一种金属作为内芯用压力加工方法包覆另一种金属做成单线或型线(材)的导体。

实心导体：一根单线构成的导体。

绞合导体：由若干根单线或股线绞成的导体。

圆形同心绞合导体：多根单线以螺旋状绞合在一起，成为具有一层或多个同心层的绞合导体，通常相邻层绞向相反。

束合导体：多根单线以螺旋状同向同节距随机绞合在一起而形成的绞合导体。

复绞导体：若干个线组以一层或多个螺旋层绞合在一起形成的绞合导体，每个线组中的单线可以束合，也可以绞合。

软导体：由直径足够小的单线绞合成的适于软电缆使用的绞合导体。

成型导体：截面形状非圆形的导体。

扇形导体：截面形状近似于扇形的成型导体。

紧压导体：通过机械紧压或者拉拔或者适当选择单线形状和单线排列以减少单线间空隙的绞合导体。

分割导体：由相互间有薄绝缘的绞合成型导体组成的绞合导体。

空心导体：具有中心通道的导体。

同心导体：围绕在一根或多根绝缘线芯外的导体。

铜皮导体：一个或几个绞合在一起的元件组成的导体，每个元件由一根或几根薄金属带螺旋绕包在纤维线上并以纤维线作支撑组成。

同心股线：复绞导体的一个元件，每个元件由一组同心绞合的单线构成。

束合股线：复绞导体的一个元件，每个元件中的单线以螺旋形同向同节距绞合在一起，但不分绞层。

同心中性导体：用作中性导体的同心导体。

换位导体：以一定根数的漆包铜或铝扁线组合成宽面相互接触的两列，按要求在两列漆包扁线的上面和下面沿窄面作同一转向的等节距换位。换位导体并用电工绝缘纸带作多层连续紧密绕包做成绕组线(注：所谓节距指的是导体中某一根漆包扁线经过一个完整换位周期后的轴向长度与组成换位导体的漆包扁线根数之商，即两个相邻换位处起点之间的轴向长度)。

2 有关金属共用的数据、单位换算和导体的强化

2.1 金属的物理性能(见表 3.1-1)

表 3.1-1 **金属的物理性能**

元 素	符 号	密 度 (20℃) (g/cm^3)	熔 点 (℃)	沸 点 (℃)	比热容 (20℃) [J/(kg·K)]	线膨胀系数 (20℃) ($10^{-6}℃^{-1}$)	热传导率 (20℃) [W/(m·K)]	体积电阻率 (20℃) ($10^{-6}\Omega \cdot cm$)	电阻温度系数 (0～100℃) ($10^{-3}℃^{-1}$)
银	Ag	10.49	961.9	2163	233.9	19.68	418.4	1.55	4.1
铝	Al	2.699	660	2494	899.6	23.6	221.8	2.654 8	4.2
金	Au	19.30	1063.0±0.0	2857	129.7	14.2	318.0	2.35	3.9
硼	B	2.34	2300	2550	1284.5	1.1	—	6.5×10^{7}	—
钡	Ba	3.5	729±2	1637	205.0	—	—	—	—
铍	Be	1.848	1290	2770	1887.0	11.6	188.3	4	6.0
铋	Bi	9.81	271.3	1564	122.2	13.2	8.4	105	4.2
碳	C	2.25	3500	4918	669.4	0.6～4.3	1.7	1375	—
钙	Ca	1.55	838	1484	631.8	22.3	125.5	3.91	4.6
镉	Cd	8.64	321.1	767	230.1	31.3	96.2	7.27	4.3
铈	Ce	6.77	798±3	3433	192.5	6.3	11.3	82.8 或 74.4	8.7
钴	Co	8.85	1495±1	2900	414.2	13.8	69.0	5.25	6.04
铬	Cr	7.19	1875	2680	460.2	6.2	66.9	12.9	2.14
铯	Cs	1.903*	28.7	670	201.5	—	18.4	20	4.8
铜	Cu	8.93	1084.88	2595	384.9	16.5	386.2	1.673 0	4.3
镝	Dy	8.55	1412	2567	171.5	9.9	10.9	93	—
铒	Er	9.07	1529	2868	167.4	12.2	14.2	86	—
铕	Eu	5.245	822	1529	179.9	35	13.8	90	—
铁	Fe	7.87	1538	2870	460.2	11.76	71.1	9.71	6.51
镓	Ga	5.907	29.78	2403	330.5	11.5	16.7～87.9	8.1～17.4	—
钆	Gd	7.90	1312	3266	297.1	4	—	—	—
锗	Ge	5.323*	937.4	2834	322.2	5.72	58.6	45	—
铪	Hf	13.3	2227	4603	146.9	5.9	—	35.1	4.19
汞	Hg	14.193	−38.36	357	138.1	18.2	8.2	95.8	0.9
铟	In	7.29	156.6	2073	234.3	32.1	86.6	8	4.7
铱	Ir	22.65	2447	4500	129.7	6.8	146.4	5.3	3.9
钾	K	0.86	63.2	757	769.9	83	108.8	6.15	5.8
镧	La	6.17	918	3464	196.6	12.1	13.8	61.5	—
锂	Li	0.534	180.54	1342	3305.4	56	43.9	9.35	4.75
镥	Lu	9.85	1662	3402	154.8	9.9	16.3	58.2	—
镁	Mg	1.74	650	1107±10	1025.1	25.2	418.4	4.45	4.2
锰	Mn	7.47	1245	2095	606.7	22.8	46.0～62.8	40～14.4	—
钼	Mo	10.22	2610	5560	276.1	4.9	142.2	5.2	4.23
钠	Na	0.9674	97.82	881.4	1234.3	68.93	133.9	4.2	4.7
铌	Nb	8.57	2468	4927	272.0	7.31	52.3	12.5	3.95
钕	Nd	7.00	1021	3074	188.3	7.6～13.5	16.3	64	—
镍	Ni	8.902	1453	2730	472.8	13.3	82.8	6.84	6.81
镎	Np	19.5	637±2	—	—	—	—	—	—
锇	Os	22.57	2700	5500	129.7	2.2～3.2	—	9.5	4.2
磷	P	1.83～2.7	44.25	280	711.3	—	—	1×10^{17}	—
铅	Pb	11.36	327.425 8	1750	129.3	29.3	34.7	20.648	3.36
钯	Pd	12.02	1552	3980	245.2	11.76	70.3	10.8	3.8
钋	Po	—	254	—	—	—	—	—	—
镨	Pr	6.77	931	3520	196.6	4.5～11.2	12.6	70	—
铂	Pt	21.45	1769	3800	131.4	9.1	71.1	10.6	3.92
钚	Pu	19.86	640	3235	138.1	2.9～6.6	6.7	141.4	—
镭	Ra	5.0	700	—	—	—	—	—	—
铷	Rb	1.53	38.9	688	334.7	90	5.9	11.6	5.53
铼	Re	21.04	3180	5900	25 698.1	—	71.1	19.3	3.11
铑	Rh	12.41	1963	3700	246.9	8.3	150.2	4.51	4.57
钌	Ru	12.45	2310±20	4080±100	238.5	5.05	—	7.6	—
硫	S	2.07	119.0±0.5	444.6	682.0	64	0.3*	2×10^{23}	—
锑	Sb	6.70	630.5±0.1	1587	205.0	8～11	25.9	37.0	5.1
钪	Sc	2.99	1539	2836	569.0	7.6～15.3	15.9	28.7～64.2	—
硒	Se	4.39～4.81	217	685	460.2	4.9	0.4～2.5	12	—
硅	Si	2.33	1410	3280	667.8	2.8～7.3	83.7	0.1	—

续表

元 素	符 号	密 度 (20℃) (g/cm^3)	熔 点 (℃)	沸 点 (℃)	比热容 (20℃) [J/(kg·K)]	线膨胀系数 (20℃) ($10^{-6}℃^{-1}$)	热传导率 (20℃) [W/(m·K)]	体积电阻率 (20℃) ($10^{-6}\Omega \cdot cm$)	电阻温度系数 (0～100℃) ($10^{-3}℃^{-1}$)
钐	Sm	7.49	1072	1794	196.6	9.6～19.0	13.4	94	—
锡	Sn	7.298 4	231.912	2770	225.9	19.9	62.8	11	4.2
锶	Sr	2.60	768	1099	—	—	—	—	—
钽	Ta	16.6	2996	5425	142.3	6.5	54.4	135.0	3.8
铽	Tb	8.25	1356	2223	184.1	7	11.3	101.5～123.5	—
锝	Tc	11.5	2200	—	—	7	50.2	18.5	—
碲	Te	6.24	449.5	989.8	196.6	18.2	5.9	$1.5\sim5.0\times10^5$	—
钍	Th	11.66	1755	～4800	117.2	11.4	77.0	15.7	3.8
钛	Ti	4.507	1668±10	3260	531.4	8.41	11.3	42	4.1
铊	Tl	11.85	303	1457	129.7	28	46.9	18	5.2
铥	Tm	9.31	1545	1950	159.0	8.8～22.2	16.7	67.6	—
铀	U	19.07	1406	4091	116.7	1.2	15.9	30	3.4
钒	V	6.1	1900±25	3400	497.9	8.3	31.0	24.8～26.0	3.4
钨	W	19.3	3410±20	5700±200	138.1	4.6	166.1	5.3	4.6
钇	Y	4.47	1522	3338	297.1	6.0～19.7	17.2	59.6	—
镱	Yb	6.9	819	1196	154.8	26.3	38.5	25	—
锌	Zn	7.133	420	906	382.8	39.7	113.0	5.89	4.2
锆	Zr	6.51～6.57	1852	3700	280.3±4	5.85	16.7	45	4.4

2.2 导体公制直径、面积表示法和英、美线规的换算

我国采用公制表示导体的线径和面积，以毫米(mm)和平方毫米(mm^2)为计量单位，简洁明了，但仍有少数国家(如美国、加拿大)采用英美线规或英制与公制并用，以英制为准。在贸易和使用中为了确认数值和单位就需要换算。在线规中直径有时用英寸表示，也有用密尔(mil)为单位表示，1个密尔等于1/1000英寸，而面积有时用平方英寸表示，也有用圆密尔(Circular mil，代号CM或Cir，mil)为单位表示，1个圆密尔为以1密尔(mil)为直径的圆面积，所以1圆密尔(Cir，mil)$=5.067\times10^{-4}mm^2$(在计算中$\pi=3.141\ 592\ 7$)。圆密尔因为是面积的单位，所以对线、杆和管面积的计量都可应用。公制线径与英美线规对照见表3.1-2。密尔与毫米换算见表3.1-3。分数英寸与毫米换算见表3.1-4。

表3.1-2 公制线径与英美线规对照表

线规			线径 (mm)	线规			线径 (mm)	线规			线径 (mm)
B.W.G.	S.W.G.	A.W.G.		B.W.G.	S.W.G.	A.W.G.		B.W.G.	S.W.G.	A.W.G.	
5/0	7/0	—	12.70	—	4	—	5.89	13	—	—	2.413
—	6/0	—	11.79	—	—	3	5.827	—	13	—	2.237
—	—	4/10	11.68	5	—	—	5.588	—	—	11	2.310
4/10	—	—	11.53	—	5	—	5.385	14	—	—	2.108
—	5/0	—	10.97	—	—	4	5.189	—	—	12	2.057
3/0	—	—	10.80	6	—	—	5.156	—	14	—	2.032
—	—	3/0	10.40	—	6	—	4.877	15	15	13	1.829
—	4/0	—	10.16	—	—	5	4.621	16	—	—	1.651
2/0	—	—	9.65	7	—	—	4.572	—	16	14	1.626
—	3/0	—	9.45	—	7	—	4.470	17	—	—	1.473
—	—	2/0	9.27	8	—	—	4.191	—	—	15	1.448
—	2/0	—	8.84	—	—	6	4.115	—	17	—	1.422
0	—	—	8.64	—	8	—	4.064	—	—	16	1.295
—	—	0	8.25	9	—	—	3.759	18	—	—	1.245
—	0	—	8.23	—	9	7	3.658	—	18	—	1.219
1	1	—	7.62	10	—	—	3.404	—	—	17	1.143
—	—	1	7.35	—	10	8	3.251	19	—	—	1.067
2	—	—	7.21	11	—	—	3.048	—	19	18	1.016
—	2	—	7.01	—	11	—	2.946	—	20	19	0.914 4
3	—	—	6.58	—	—	9	2.900	20	—	—	0.889 0
—	—	2	6.54	12	—	—	2.769	21	21	20	0.812 8
—	3	—	6.40	—	12	—	2.642	—	—	21	0.723 0
4	—	—	6.04	—	—	10	2.591	22	22	—	0.711 2

续表

线规			线径	线规			线径	线规			线径
B. W. G.	S. W. G.	A. W. G.	(mm)	B. W. G.	S. W. G.	A. W. G.	(mm)	B. W. G.	S. W. G.	A. W. G.	(mm)
—	—	22	0.643 0	—	34	—	0.233 7	—	46	—	0.061 0
23	—	—	0.635 0	32	—	—	0.228 6	—	—	43	0.056 4
—	23	—	0.609 6	—	—	31	0.226 1	—	47	—	0.050 8
—	—	23	0.574 0	—	35	—	0.213 4	—	—	44	0.050 2
24	24	—	0.558 8	33	—	—	0.203 2	—	—	45	0.044 7
—	—	24	0.510 6	—	—	32	0.200 7	—	48	—	0.040 6
25	25	—	0.508 0	—	36	—	0.193 0	—	—	46	0.039 8
26	26	—	0.457 2	—	—	33	0.180 3	—	—	47	0.035 5
—	—	25	0.454 7	34	—	—	0.177 8	—	—	48	0.031 6
—	27	—	0.416 6	—	37	—	0.172 7	—	49	—	0.030 5
27	—	—	0.406 4	—	—	34	0.160 0	—	—	49	0.281
—	—	26	0.403 9	—	38	—	0.152 4	—	50	—	0.025 4
—	28	—	0.375 9	—	—	35	0.142 2	—	—	50	0.025 1
—	—	27	0.360 6	—	39	—	0.132 1	—	—	51	0.022 6
28	—	—	0.355 6	35	—	36	0.127 0	—	—	52	0.020 2
—	29	—	0.345 4	—	40	—	0.121 9	—	—	53	0.018 0
29	—	—	0.330 2	—	41	37	0.111 8	—	—	54	0.016 0
—	—	28	0.320 0	36	42	38	0.101 6	—	—	55	0.014 3
—	30	—	0.315 0	—	43	—	0.091 4	—	—	56	0.012 7
30	—	—	0.304 8	—	—	39	0.889	—	—	57	0.011 3
—	31	—	0.294 6	—	44	—	0.081 3	—	—	58	0.010 0
—	—	29	0.287 0	—	—	40	0.078 7	—	—	59	0.009 0
—	32	—	0.274 3	—	45	41	0.071 1	—	—	60	0.008 0
31	33	30	0.254 0	—	—	42	0.063 3				

注 B. W. G—伯明翰线规；S. W. G—英国标准线规；A. W. G—美国线规。

表 3.1-3 密尔(mil)与毫米(mm)换算表

密尔 (mil)	毫米 (mm)	密尔 (mil)	毫米 (mm)	密尔 (mil)	毫米 (mm)	密尔 (mil)	毫米 (mm)
1	0.025 4	26	0.660 4	51	1.295 4	76	1.930 4
2	0.050 8	27	0.685 8	52	1.320 8	77	1.955 8
3	0.076 2	28	0.711 2	53	1.346 2	78	1.981 2
4	0.101 6	29	0.736 6	54	1.371 6	79	2.006 6
5	0.127 0	30	0.762 0	55	1.397 0	80	2.032 0
6	0.152 4	31	0.787 4	56	1.422 4	81	2.057 4
7	0.177 8	32	0.812 8	57	1.447 8	82	2.082 8
8	0.203 2	33	0.838 2	58	1.473 2	83	2.108 2
9	0.228 6	34	0.863 6	59	1.498 6	84	2.133 6
10	0.254 0	35	0.889 0	60	1.524 0	85	2.159 0
11	0.279 4	36	0.914 4	61	1.549 4	86	2.184 4
12	0.304 8	37	0.939 8	62	1.574 8	87	2.209 8
13	0.330 2	38	0.965 2	63	1.600 2	88	2.235 2
14	0.355 6	39	0.990 6	64	1.625 6	89	2.260 6
15	0.381 0	40	1.016 0	65	1.651 0	90	2.286 0
16	0.406 4	41	1.041 4	66	1.676 4	91	2.311 4
17	0.431 8	42	1.066 8	67	1.701 8	92	2.336 8
18	0.457 2	43	1.092 2	68	1.727 2	93	2.362 2
19	0.482 6	44	1.117 6	69	1.752 6	94	2.387 6
20	0.508 0	45	1.143 0	70	1.778 0	95	2.413 0
21	0.533 4	46	1.168 4	71	1.803 4	96	2.438 4
22	0.558 8	47	1.193 8	72	1.828 8	97	2.463 8
23	0.584 2	48	1.219 2	73	1.854 2	98	2.489 2
24	0.609 6	49	1.244 6	74	1.879 6	99	2.514 6
25	0.635 0	50	1.270 0	75	1.905 0	100	2.540 0

表 3.1-4　　分数英寸(in)与毫米(mm)换算表

分数(英寸)(in)				毫米(mm)	分数(英寸)(in)				毫米(mm)
1/64	—	—	—	0.397	33/64	—	—	—	13.097
—	1/32	—	—	0.794	—	17/32	—	—	13.494
3/64	—	—	—	1.191	35/64	—	—	—	13.891
—	—	1/16	—	1.588	—	—	9/16	—	14.288
5/64	—	—	—	1.984	37/64	—	—	—	14.684
—	3/32	—	—	2.381	—	19/32	—	—	15.081
7/64	—	—	—	2.778	39/64	—	—	—	15.478
—	—	—	1/8	3.175	—	—	—	5/8	15.875
9/64	—	—	—	3.572	41/64	—	—	—	16.272
—	5/32	—	—	3.969	—	21/32	—	—	16.669
11/64	—	—	—	4.366	43/64	—	—	—	17.066
—	—	3/16	—	4.763	—	—	11/16	—	17.463
13/64	—	—	—	5.159	45/64	—	—	—	17.859
—	7/32	—	—	5.556	—	23/32	—	—	18.256
15/64	—	—	—	5.953	47/64	—	—	—	18.653
—	—	—	1/4	6.350	—	—	—	3/4	19.050
17/64	—	—	—	6.747	49/64	—	—	—	19.447
—	9/32	—	—	7.144	—	25/32	—	—	19.844
19/64	—	—	—	7.541	51/64	—	—	—	20.241
—	—	5/16	—	7.938	—	—	13/16	—	20.638
21/64	—	—	—	8.334	53/64	—	—	—	21.034
—	11/32	—	—	8.731	—	27/32	—	—	21.431
23/64	—	—	—	9.128	55/64	—	—	—	21.828
—	—	—	3/8	9.525	—	—	—	7/8	22.225
25/64	—	—	—	9.922	57/64	—	—	—	22.622
—	13/32	—	—	10.319	—	29/32	—	—	23.019
27/64	—	—	—	10.716	59/64	—	—	—	23.416
—	—	7/16	—	11.113	—	—	15/16	—	23.813
29/64	—	—	—	11.509	61/64	—	—	—	24.209
—	15/32	—	—	11.906	—	31/32	—	—	24.606
31/64	—	—	—	12.303	63/64	—	—	—	25.003
—	—	—	1/2	12.700	—	—	—	1	25.400

注　换算按 1in=25.4mm 计算。

2.3　导体电阻、电阻率、电导率及有关换算

电阻是衡量金属导电能力的重要指标和设计选用导电金属的主要参数。导体的导电性能可以用电阻、电阻率和电导率百分数表示，它们之间有一定的换算关系。在英制中的电阻率由于使用的单位不同，所以电阻率和电导率之间亦有相应的换算关系。

金属的电阻常以电阻率 ρ（$\Omega \cdot mm^2/m$）表示

$$\rho = R\frac{S}{L}$$

式中：R 为导体电阻，Ω；S 为导体截面，mm^2；L 为导体长度，m。

在交流情况下，导体中产生交变磁场，电流不是均匀地分布在整个导体截面上的。在高频下，由于集肤效应的影响，愈接近表面电流密度愈大。为了减小集肤效应的影响，可减小单线直径及采用绞线或空心线等结构。频率很高时，表面可镀覆高导电金属银等材料。

影响导体电阻的主要因素有：

（1）温度：金属的电阻随温度升高而增大。在一般情况下，电阻与温度呈如下线性关系

$$R = R_0[1+\alpha(T-T_0)],\quad \alpha = \frac{R-R_0}{R_0(T-T_0)}$$

式中：R 为温度 T 时的电阻；R_0 为温度 T_0 时的电阻；α 为电阻温度系数。

（2）杂质及合金元素：杂质和合金元素导致金属晶格畸变，电阻增加。其影响程度分如下三种情况：

1）对基体金属的影响。与元素或杂质的含量［摩尔分数（%）］及其同基体金属的价电子差数有关。

2）元素或杂质与基体金属的原子半径之差愈大，晶格畸变及电阻增加愈大。

3）元素或杂质在基体金属中形成固溶体时，电阻显著增加；形成两相混合物时，电阻的变化为一直线。

（3）冷变形：纯金属由于冷变形引起的电阻增加，一般不超过4%，但合金稍高。

（4）热处理：金属冷变形引起强度和硬度增加，导电性及塑性降低，退火可恢复其性能。退火温度过高或加热时间过长，金属力学性能变坏，但电阻变化不显著。

如上所述导体的导电性能可用电阻率、电导率百分数表示，就电阻率而言还可用“体积电阻率”和“重量电阻率”来表示，但在我国有关的导体标准中采用的是体积电阻率表示法。这些单位的换算都基于1913年国际电工委员会(IEC)的规定，即采用国际退火铜标准(IACS)为基准：20℃(68°F)时为 $1/58\Omega \cdot mm^2/m$，相当于100%IACS电导率。20℃(68°F)时 $0.017\ 241\Omega \cdot mm^2/m$ 和 $0.153\ 28\Omega \cdot g/m^2$ 分别是100%IACS电导率的退火铜体积电阻率和重量电阻率的国际等效值(取5位有效数)。后者表示长1m，质量1g的铜线具有 $0.153\ 28\Omega$ 的电阻。它等于 $875.20\Omega \cdot lb/mile^2$ 的电阻率值，它表示长1mile，质量1lb的铜线的电阻。它亦等于例如截面积为 $1cm^2$ 的铜杆每1cm的电阻为 $1.724\ 1\mu\Omega$。用5位有效数字来表示电阻率，并不意味着要求测量精度比ASTMB193测量方法中规定的精度更高。为了能比较精确地从一个电阻率单位换算到另一个电阻率单位，使用5位有效数字是合理的。表3.1-5示出的各等效电阻率值是从基本的IEC值($1/58\Omega \cdot mm^2/m$)推算而得，计算到7位有效数

字，然后修约到 5 位有效数字。

表 3.1-5 铜的等效电阻率值①

20℃(68°F)时电导率，%IACS	100.0	20℃(68°F)时电导率，%IACS	100.0	20℃(68°F)时电导率，%IACS	100.0
体积电阻率		体积电阻率		重量电阻率	
Ω·cmil/ft	10.371	Ω·in	0.678 79	Ω·lb/mile²	875.20
Ω·mm²/m	0.017 241	Ω·cm	1.7241	Ω·g/m²	0.153 28

① 100% IACS（软铜）的各等效电阻率值是按基本的 IEC 值（1/58Ω·mm²/m），分别使用精确到至少 7 位有效数字的各项换算系数计算而得的。其他电导率（铝等）相对应的电阻率值，可将这些数值乘以电导率比的倒数推算，也可乘以密度比而计算出，两者均须精确到至少 7 位有效数字。

重量电阻率在米制单位中以 Ω·g/m² 为单位，在美国常用单位中以 Ω·lb/mile² 为单位，重量电阻率可按下式算出

$$\rho_\omega = (W/L_1 L_2)R$$

式中：ρ_ω 为重量电阻率，Ω·g/m² 或 Ω·lb/mile²；W 为试样质量，g 或 lb；L_1 为用于测定 R 的标距长度，m 或 mile；L_2 为试样长度，m 或 mile；R 为电阻测量值，Ω。

电阻率和电导率的换算采用表 3.1-6 所示的各个公式和系数，可方便地进行各种单位的体积电阻率、重量电阻率和电导率的换算。此间列出的系数适用于所有的金属电导体材料。表 3.1-7 列出了常用电导体材料的密度值 δ。

表 3.1-6 电阻率和电导率的换算

按表列关系可换算成的单位	已知 N							
	20℃时体积电阻率				20℃时重量电阻率		20℃时电导率	
	Ω·cmil/ft	Ω·mm²/m	μ(Ω·in)	μ(Ω·cm)	Ω·lb/mile²	Ω·g/m²	%IACS（体积为基础）	%IACS（重量为基础）
20℃时体积电阻率								
Ω·cmil/ft		N×601.53	N×15.279	N×6.0153	N×0.105 35×(1/δ)	N×601.53×(1/δ)	(1/N)×1037.1	(1/N)×9220.0×(1/δ)
Ω·mm²/m	N×0.001 662 4		N×0.025 400	N×0.010 000	N×0.000 175 13×(1/δ)	N×(1/δ)	(1/N)×1.7241	(1/N)×15.328×(1/δ)
μ/Ω·in	N×0.065 450	N×39.370		N×0.393 70	N×0.006 895 0×(1/δ)	N×39.370×(1/δ)	(1/N)×67.879	(1/N)×603.45×(1/δ)
μ/Ω·cm	N×0.166 24	N×100.00	N×2.5400		N×0.017 513×(1/δ)	N×100.00×(1/δ)	(1/N)×172.41	(1/N)×1532.8×(1/δ)
20℃时重量电阻率								
Ω·lb/mile²	N×9.492 4×δ	N×5710.0×δ	N×145.03×δ	N×57.100×δ		N×5710.0	(1/N)×9844.8×δ	(1/N)×87 520
Ω·g/m²	N×0.001 6624×δ	N×δ	N×0.025 400×δ	N×0.010 000×δ	N×0.000 175 13		(1/N)×1.7241×δ	(1/N)×15.328
20℃时电导率								
%IACS（体积为基础）	(1/N)×1037.1	(1/N)×1.7241	(1/N)×67.879	(1/N)×172.41	(1/N)×9844.8×δ	(1/N)×1.7241×δ		N×0.112 49×δ
%IACS（重量为基础）	(1/N)×9220.0×(1/δ)	(1/N)×15.328×(1/δ)	(1/N)×603.45×(1/δ)	(1/N)×1532.8×(1/δ)	(1/N)×87 520	(1/N)×15.328	N×8.89×(1/δ)	

注 这些系数仅适用于已校正到 20℃（68°F）时的电阻率和电导率值。当仅在体积单位之间或仅在重量单位之间进行换算时，它们可用于任何温度。常用导体材料的密度值 δ 列于表 3.1-7 中。

表 3.1-7 导体材料的密度和电阻温度系数

材料	20℃时的近似密度，δ (g/cm³)	20℃时的电阻温度系数，α
铜线，%IACS		
100	8.89	0.003 93
98.40	8.89	0.003 87
98.16	8.89	0.003 86
97.80	8.89	0.003 84
97.66	8.89	0.003 84
97.40	8.89	0.003 83
97.16	8.89	0.003 82
96.66	8.89	0.003 80
96.61	8.89	0.003 80
96.16	8.89	0.003 78
94.16	8.89	0.003 70
93.15	8.89	0.003 66

续表

材料	20℃时的近似密度，δ (g/cm³)	20℃时的电阻温度系数，α
镀银铜线，ASTMB298①		
A 级	8.91	0.003 93
B 级	8.93	0.003 93
C 级	8.95	0.003 94
D 级	8.99	0.003 94
E 级	9.05	0.003 95
镀镍铜线，ASTMB355②		
2 级	8.89	0.003 95
4 级	8.89	0.003 97
7 级	8.89	0.004 00
10 级	8.89	0.004 04
27 级	8.89	0.004 22

续表

材　　料	20℃时的近似密度，δ（g/cm³）	20℃时的电阻温度系数，α
青铜线，ASTMB9③		
40 合金	8.89	0.001 57
55 合金	8.89	0.002 24
80 合金	8.89	0.003 22
铜合金线，ASTMB105④		
8.5 合金	8.78	0.000 42
13 合金	8.78	0.000 63
15 合金	8.54	0.000 72
20 合金	8.89	0.000 79
30 合金	8.89	0.001 18
40 合金	8.89	0.001 57
55 合金	8.89	0.002 24
80 合金	8.89	0.003 22
85 合金	8.89	0.003 42
铜包铝线，ASTMB566⑤		
10A 和 10H 级	3.32	0.004 05
15A 和 15H 级	3.63	0.004 04
1350 铝线		
61.8	2.70	0.004 08
61.5	2.70	0.004 06
61.4	2.70	0.004 06
61.3	2.70	0.004 05
61.2	2.70	0.004 04
61.0	2.70	0.004 03
6101 铝合金线		
%IACS		
59.5	2.70	0.003 93
59.0	2.70	0.003 90
57.0	2.70	0.003 77
56.5	2.70	0.003 73
56.0	2.70	0.003 70
55.0	2.70	0.003 63
铝合金线		
5005-H19	2.70	0.003 53
6201-T81	2.70	0.003 47
铝包钢线	6.59	0.003 6
铜包钢线		
30A，HS 和 EHS 级	8.15	0.003 78
40A，HS 和 EHS 级	8.25	0.003 78
镀锌钢线（电话电报用）		
A 类镀层：		
EBB 级	7.83	0.005 6
BB 级	7.83	0.004 6
钢级	7.83	0.004 2
B 类镀层：		
EBB 级	7.80	0.005 6
BB 级	7.80	0.004 6
钢级	7.80	0.004 2
C 类镀层：		
EBB 级	7.77	0.005 6
BB 级	7.77	0.004 6
钢级	7.77	0.004 2

① ASTM B 298 镀银软或退火铜线。
② ASTM B 355 镀镍软或退火铜线。
③ ASTM B 9 青铜电车线。
④ ASTM B 105 导体用拉制硬铜合金线。对于 ASTM B 105 中一些级别来说允许有各种成分，而且所给出的密度值不可以用于按这些标准提供的所有材料。在有疑义的情况下，密度值应必须测定或从制造厂获取。
⑤ ASTM B 566 铜包铝线。

2.4　导体的强化

导体在强电和弱电的应用中，并不是都要高导电的，对电导率的需求，大致可分为 8 档，即 100% IACS、97% IACS、70% IACS、61% IACS、53% IACS、40% IACS、20%IACS 和 10%IACS 以上。而对抗拉强度的需求大约也可分为 4 档，即超高强、高强度、普通强度和低强度。在导体的设计中，在满足电导率要求的条件下，为了提高导体的强度，有关的强化措施有：

（1）采用组合结构的导体。用金属（如镀锌钢线等）或非金属（如复合碳纤维材料等）材料加强。

（2）采用双金属导体。选择被包覆的高强度材料进行强化。

（3）采用合金化材料的导体。通过使用合金化的材料，用以提高强度、耐热性和特殊要求的性能等，并尽可能少降低电导率，在生产中常用的方法有如下 3 种：

1）固溶强化。合金元素均匀地溶解在基体金属中形成置换固溶体时，合金保持基体金属的晶格。因溶质和溶剂金属原子半径不同，造成晶格畸变，金属的硬度、强度和电阻升高，强化程度随溶质原子的溶解量、溶质与溶剂原子的半径差以及原子价之差等的增大而增大，电导率随之降低。

2）时效强化。用淬火和时效以提高合金强度。其效果与时效过程中析出的强化相性质、数量和分布状态有关。强化相数量一定，强化相质点的弥散度愈大，合金的强化程度也愈大。固溶处理后进行强烈地冷变形，则时效强化的效果更大。

3）弥散强化。弥散强化的质点是在制造过程中加入的金属氧化物微粒或极细的纤维。氧化物在高温下不溶解于基体金属，因而这类合金具有更好的耐热性，接近熔点时，仍有相当高的强度。机械混合的氧化物含量不高，对基体金属晶格畸变影响小，因此具有较好的导电性。

（4）采用铜基复合材料强化的导体。铜基复合材料兼有高强度和高导电的特点，所以“复合材料法”是当前高强度高导电铜合金的研究热点和发展趋势，但还没有达到产业化的大生产阶段。复合材料法是以铜为基体，以金属或非金属纤维、晶须或颗粒等组分为增强相的非均匀混合物，其特点是具有连续的金属基体，因此，在增强的同时仍有较高的（与一般的导电铜合金相比）电导率。它分为人工复合材料法、原位反应自生复合材料法、塑性变形原位复合材料法和共晶原位自生复合材料法等四大类，铜—铬合金主要采用后两种方法强化其性能。

塑性变形自生复合材料是利用固相下两相互不相溶也不形成化合物的原理，在大变形作用下，使两相沿轧制方向产生剧烈变形，使基体中的等轴晶、树枝晶转变为纤维状。该自生纤维复合材料的强度远远大于按混合法则求得的计算值。塑性变形自生复合材料的制备过程包括：制坯、预变形和最终变形三个阶段。制坯通常采用铸造法，Cu－Cr 合金采用真空感应炉熔炼，熔炼过共晶 Cu－Cr 合金制得两相复合体，此时，先共晶 β—Cr 呈枝晶分布于铜基体中；预变形采用挤压、轧制、锻造等方法对两相复合体合金进行大变形量塑性变形，使先共晶 β—Cr 由枝晶转变为纤维状结构，从而使合金成为纤维增强的复合材料。最终变形主要采用多道次的冷拉拔。塑性变形自生复合材料中的纤维状增强相沿轧制方向平行排列，与基体有良好的界面相容性，可有效地阻止位错的移动，从而提高了合金的强度，同时保持较好高温性能。通过大塑性变形使先共晶 β—Cr 纤维化；当电流方向

与纤维排列方向一致时，可有效提高材料的电导率。塑性变形自生复合材料法可用于生产大截面、异形断面的型材。

原位自生复合材料是指共晶或偏晶合金通过定向凝固方法使基体、增强相均匀、交替、定向排列，从而形成具有纤维强化特征的复合材料。通过控制共晶合金凝固的特性使定向共晶相具有高强度组合、相间结合良好、在接近共晶熔点的高温下仍能保持高强度，而且高温稳定性好。该方法不仅局限于共晶，偏离共晶成分的合金、有包晶和偏晶的合金等在快速冷却定向凝固时的生长也可出现规则排列的增强纤维。定向凝固自生复合材料中均匀、定向排列的 β—Cr 纤维其弹性模量大，充分发挥了 β—Cr 纤维的强化作用；β—Cr 纤维与基体相界面结合强度高，有利于应力从基体向 β—Cr 纤维传递；两相是在高温接近热力学平衡条件下缓慢生长而成，界面能低，因此自生复合材料机械性能高，而且稳定性好。由于充分发挥了共生生长的二相各自的长处使其机械性能提高的同时对电导率的影响限制在很小的程度，从而达到了强度和导电性能兼顾的综合效应。

(5) 采用纳米孪晶强化的导体。纳米孪晶纯铜兼有高强度和高导电的特性，目前正在把发现转向技术，以求获得实际的应用。

3 高纯铝及其应用

高纯铝由于其纯度高、电导率高、柔软性好（强度低）、导热性好和耐蚀性好，因此在特殊的应用中也是一种必不可缺的材料。高纯铝除用于电解电容器铝箔外，可用于诸如超导体的稳定化材料、高导柔软电缆的芯线、低温电缆的导体、电解电容器的导针、蒸镀铝膜用线、整流器线材和电子元器件用线等。高纯铝的制品主要有锭、箔、杆、棒和线。

制造高纯铝的方法主要有三层液电解法（简称三层法）和偏析法两种，后者因节能比较先进，可以降低成本，提高纯度。我国众和铝业、包头铝业、贵州铝厂等均可生产高纯铝，其中新疆众和精铝有限公司是中国当前最大的高纯铝生产企业，总生产能力 25 000t/年。

3.1 铜、铝导体的低温电阻率和在超导体稳定化材料中的应用

为了提高超导体的热电稳定性，必要条件之一要把超导线埋在铜或铝的常导基体中，组成多股细丝的复合超导体，两者之间须具有良好的金属结合，以保证高的热电传递能力。表 3.1-8 示出了各种铝和铜在 4.2K、77K 和 273K 下的电阻率。在低温下作为超导体的稳定化材料，铝比铜有下列优点，铝的缺点为与其他金属较难焊合，故使用范围受到一定影响。

表 3.1-8 各种铝和铜在 4.2K、77K 和 273K 下的电阻率

材料	纯度和热处理条件	4.2K×10^{-9} (Ω·cm)	77K×10^{-7} (Ω·cm)	273K×10^{-6} (Ω·cm)
铝	99.99%,拉制	14.90	2.39	2.30
	99.99%,退火,350℃,1h	5.38	2.13	2.25
	99.999%,拉制	2.07	2.07	2.20
	99.999%,退火,350℃,1h	2.03	2.05	2.26
	99.999%,退火,400℃,1h	1.93	1.99	2.25
	普通铝导体(电机用)	40.00	2.64	2.45
铜	无氧高导电铜(OFHC)(超导体稳定用)	10.60	1.95	1.58
	普通铜导体(电机用)	38.10	2.32	1.59

(1) 99.99%以上的高纯铝（退火）在 70K 以下的电阻率比无氧高导电铜（OFHC）低，这可减少由电流分路引起的焦耳热。

(2) 高纯铝的热导率至少比无氧高导电铜高一个数量级，这减少在线圈中局部的温度升高。

(3) 单位体积铝的热容量小于铜，这可使铝冷下来的能量小于铜的 64%。如果稳定条件铜、铝相同，那么铝的数量可减少，由此可减少制冷费用。

(4) 铝的密度仅为铜的 1/3，由于所需的铝量比较少，所以磁体的重量仅为铜稳定化磁体重量的 1/4。这个性能有利于超导磁体多方面的应用。

(5) 高纯铝在室温下有“自退火”的性能。这样，当绕制线圈时可消除由于应力引起的电阻率的增加。

(6) 在铝的表面上可采用阳极氧化的办法，获得一层很薄的铝氧化膜绝缘层，该绝缘层与导体有较好的接触，机械结合比较牢，与有机绝缘那样有很好的耐击穿电压的性能，且其厚度还比有机绝缘薄，该绝缘的热导率也比有机绝缘的好。从厚度和热导率着眼，在线圈中的热导率可增加 2～3 个数量级。

3.2 高纯铝标准

(1) GB/T 8644—2000《重熔用精铝锭》。牌号及参数见表 3.1-9。

表 3.1-9 重熔用精铝锭

牌号	Al 不小于	化学成分（%）杂质不大于						
		Fe	Si	Cu	Zn	Ti	其他杂质每种	总和
Al99.996	99.996	0.0010	0.0010	0.0015	0.001	0.001	0.001	0.004
Al99.993	99.993	0.0015	0.0013	0.0030	0.001	0.001	0.001	0.007
Al99.99	99.99	0.0030	0.0030	0.0050	0.002	0.002	0.001	0.004
Al99.95	99.95	0.02	0.02	0.01	0.005	0.002	0.005	0.05

注 1. 铝含量按 100%与杂质 Fe、Si、Cu、Zn、Ti 含量的总和（百分数）之差来计算。

2. 表中未列其他杂质元素，如需方有特殊要求，可由供需双方协商。

3. 分析数值的判定采用修约比较法，按 GB/T 8170—1987《数值修约规则》第 3 章的有关规定进行，修约数位与表中所列限数位一致。

重熔用精铝锭：

标准：GB/T 8644—2000《重熔用精铝锭》。

牌号：Al99.996、Al99.993、Al99.99、Al99.95 四个牌号。

(2)《精铝杆》（Q/ZHQ2.05—2004，众和公司企标）。型号及参数见表 3.1-10。

表 3.1-10 精 铝 杆

型号	Al 含量 (%)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)	电阻率 ($n\Omega\cdot m$)(20℃)
LG1	99.85	78～90	15	27.55
LG2	99.90	73～85	15	27.55
LG3	99.93	70～83	17	27.50
LG4	99.97	65～80	17	27.00
LG5	99.99	60～75	18	27.00

型号	Al 不小于	化学成分（%）杂质含量，不大于						
		Fe	Si	Cu	Zn	Ti	其他杂质每种	总和
LG1	99.85	0.10	0.08	0.005	0.030	0.015	0.015	0.15
LG2	99.90	0.07	0.05	0.005	0.025	0.015	0.010	0.10
LG3	99.93	0.04	0.04	0.005	0.010	0.010	0.007	0.07
LG4	99.97	0.015	0.015	0.005	0.005	0.002	0.003	0.03
LG5	99.99	0.003	0.003	0.005	0.002	0.002	0.001	0.01

(3) Al99.999 高纯铝锭、高纯铝棒和高纯铝线（YS/T 275—2000《高纯铝》）。产品名称及参数见表 3.1-11。

表 3.1-11 Al99.999 高纯铝锭、棒和线

产品名称	牌号或品位	规格（mm）	备 注
高纯铝锭	Al99.999（YS/T 275-2000）	—	新疆众和股份有限公司可按客户要求定做
高纯铝棒	Al99.999	Φ30～120	
高纯铝线	Al99.999	Φ1～4.0	

4 导体的金属加强材料

为了提高导体的强度，往往需要用加强材料，特别是在架空输、配电线路上应用的架空导线。加强材料主要有金属和非金属[如复合碳纤维加强芯(线)]两类。金属加强材料主要为钢线，钢种涉及低碳、中碳、高碳和合金钢[如殷(Invar)钢]，不锈钢。钢线在导体中应用，除为了生产双金属线需用钢盘条外，都需热镀锌、锌合金和铝的镀层(如纯锌、锌—5%铝—稀土合金和铝的镀层)，现在镀铝钢线在导体上的应用，基本上已经淘汰，被铝包钢线所代替。根据对导体耐腐程度要求的不同，镀层厚度(重量)又有不同级别的区分。

4.1 架空绞线用镀锌钢线❶

4.1.1 适用范围

适用于架空绞线结构用和（或）加强用镀锌钢线。

它包括各种结构的所有单线，单线直径（包括镀层）的范围为 1.25～5.50mm。

为满足绞线用户的需要，有 3 个强度等级的钢线可供选择：普通强度、高强度和特高强度，分别用 1 级、2 级和 3 级表示。

有 2 个级别的镀锌层：A 级和 B 级。镀锌层用每单位面积最小锌层的质量来表示。

4.1.2 镀锌钢线的标准值

计算时，镀锌钢线应使用下列数值：A 级和 B 级镀锌钢线 20℃时的密度（kg/dm^3）：7.78；线膨胀系数（$℃^{-1}$）：11.5×10^{-6}。

4.1.3 接头

热轧盘条或半成品钢线，在热处理前后及冷拉前，允许用电阻对焊或闪光焊进行接头。由焊接过的盘条拉制成的无镀层的成品钢线，其最小抗拉强度应不小于相邻未焊接过的钢线经试验得到的最小抗拉强度的 80%，并且在任何情况下都要求焊接过的钢线的抗拉强度大于表 3.1-13、表 3.1-14 或表 3.1-15 规定的抗拉强度的 90%，除焊接过的那段盘条拉制的成品钢线不要求通过韧性卷绕和（或）扭转试验之外，这种钢线有镀层的成品钢线不应有任何类型的接头。

4.1.4 性能要求

镀锌层质量要求，见表 3.1-12。

普通强度镀锌钢线、高强度镀锌钢线和特高强度镀锌钢线的力学性能、扭转要求和卷绕试验芯轴直径，分别见表 3.1-13、表 3.1-14 和表 3.1-15。

表 3.1-12 镀锌层质量要求

标称直径 D（mm）		镀锌层单位面积质量最小值（g/m^2）		标称直径 D（mm）		镀锌层单位面积质量最小值（g/m^2）	
大于	小于及等于	A 级	B 级	大于	小于及等于	A 级	B 级
1.24	1.50	185	370	3.00	3.50	245	490
1.50	1.75	200	400	3.50	4.25	260	520
1.75	2.25	215	430	4.25	4.75	275	550
2.25	3.00	230	460	4.75	5.50	290	580

表 3.1-13 普通强度镀锌钢线的力学性能、扭转要求和卷绕试验芯轴直径

标称直径 D（mm）		直径公差（mm）	1%伸长时的应力最小值（MPa）	抗拉强度最小值（MPa）	伸长率最小值①（%）	卷绕试验芯轴直径（mm）	扭转试验扭转次数②最小值
大于	小于及等于						
			A 级镀锌层				
1.24	2.25	±0.03	1170	1340	3.0	1D	18
2.25	2.75	±0.04	1140	1310	3.0	1D	16
2.75	3.00	±0.05	1140	1310	3.5	1D	16
3.00	3.50	±0.05	1100	1290	3.5	1D	14
3.50	4.25	±0.06	1100	1290	4.0	1D	12
4.25	4.75	±0.06	1100	1290	4.0	1D	12
4.75	5.50	±0.07	1100	1290	4.0	1D	12
			B 级镀锌层				
1.24	2.25	±0.05	1100	1240	4.0	1D	
2.25	2.75	±0.06	1070	1210	4.0	1D	
2.75	3.00	±0.06	1070	1210	4.0	1D	
3.00	3.50	±0.07	1000	1190	4.0	1D	
3.50	4.25	±0.09	1000	1190	4.0	1D	
4.25	4.75	±0.10	1000	1190	4.0	1D	
4.75	5.50	±0.11	1000	1190	4.0	1D	

① 伸长率的最小值是对 250mm 标距而言。如采用其他标距，则这些数值应使用 650/（标距+400）这个系数进行校正。

② 扭转试验试样长度：钢线外径的 100 倍。

表 3.1-14 高强度镀锌钢线的力学性能、扭转要求和卷绕试验芯轴直径

标称直径 D（mm）		直径公差（mm）	1%伸长时的应力最小值（MPa）	抗拉强度最小值（MPa）	伸长率最小值①（%）	卷绕试验芯轴直径（mm）	扭转试验扭转次数②最小值
大于	小于及等于						
			A 级镀锌层				
1.24	2.25	±0.03	1310	1450	2.5	3D	16
2.25	2.75	±0.04	1280	1410	2.5	3D	16
2.75	3.00	±0.05	1280	1410	3.0	4D	16
3.00	3.50	±0.05	1240	1410	3.0	4D	14
3.50	4.25	±0.06	1170	1380	3.0	4D	12
4.25	4.75	±0.06	1170	1380	3.0	4D	12
4.75	5.50	±0.07	1170	1380	3.0	4D	12
			B 级镀锌层				
1.24	2.25	±0.05	1240	1380	2.5	3D	
2.25	2.75	±0.06	1210	1340	2.5	3D	
2.75	3.00	±0.06	1210	1340	3.0	4D	
3.00	3.50	±0.07	1170	1340	3.0	4D	
3.50	4.25	±0.09	1100	1280	3.0	4D	
4.25	4.75	±0.10	1100	1280	3.0	4D	
4.75	5.50	±0.11	1100	1280	3.0	4D	

① 伸长率的最小值是对 250mm 标距而言。如采用其他标距，则这些数值应使用 650/（标距+400）这个系数进行校正。

② 扭转试验试样长度：钢线外径的 100 倍。

4.1.5 试验

4.1.5.1 力学性能试验

（1）1%伸长时的应力。应将从每个试样上截取的一个试件在拉力试验机的夹头内夹紧。按表 3.1-16 第 2 栏规定的相应的初应力施加负荷，并按 250mm 标距安装引伸仪，然后调节到表 3.1-16 第 3 栏规定的起始值（如果购买方与制造方达成协议，可以使用 100mm 或 200mm 标距。此时，引伸仪的起始值应按表 3.1-16 规定的起始值乘实际试验标距与 250mm 标距之比来校正）。如果试验后接着要求进行其他试验，则在施加负荷前应在钢线上标出标距。

❶ 摘自 GB/T 3428—2002《架空绞线用镀锌钢线》。

然后应均匀地增加负荷，直到引伸仪指示出伸长了原始标距的 1%为止。在该点记下负荷读数，并应将该负荷除以镀锌钢线截面积（由实测直径计算）计算得到 1%伸长时的应力值。该数值应不小于表 3.1-13、表 3.1-14 或表 3.1-15 相应栏的数值。

表 3.1-15 特高强度镀锌钢线的力学性能、扭转要求和卷绕试验芯轴直径

标称直径 D（mm）		直径公差（mm）	1%伸长时的应力最小值（MPa）	抗拉强度最小值（MPa）	伸长率最小值①（%）	卷绕试验芯轴直径（mm）	扭转试验扭转次数②最小值
大于	小于及等于						
			A 级镀锌层				
1.24	2.25	±0.03	1450	1620	2.0	4D	14
2.25	2.75	±0.04	1410	1590	2.0	4D	14
2.75	3.00	±0.05	1410	1590	2.5	5D	12
3.00	3.50	±0.05	1380	1550	2.5	5D	12
3.50	4.25	±0.06	1340	1520	2.5	5D	10
4.25	4.75	±0.06	1340	1520	2.5	5D	10
4.75	5.50	±0.07	1270	1500	2.5	5D	10

① 伸长率的最小值是对 250mm 标距而言。如采用其他标距，则这些数值应使用 650/（标距+400）这个系数进行校正。

② 扭转试验试样长度：钢线外径的 100 倍。

表 3.1-16 测定 1%伸长时的应力的初应力和引伸仪起始值

实测直径（mm）		初应力（MPa）	引伸仪起始值（250mm 标距）①	实测直径（mm）		初应力（MPa）	引伸仪起始值（250mm 标距）①
小于	小于及等于			小于	小于及等于		
1.24	2.25	100	0.125	3.00	4.75	300	0.375
2.25	3.00	200	0.250	4.75	5.50	400	0.500

① 采用其他标距时，引伸仪起始值可使用标距/250mm 这一系数来校正。

试验后此试件可用于拉力试验和伸长率试验。

（2）拉力试验。从每个试样上截取一个试件，在合适的拉力试验机上进行拉断力试验。

在 1%伸长前期和 1%伸长后期，应均匀地增加负荷。拉力试验机夹头的移动速度应不小于标距的 0.1 倍（单位为 mm/min），也不大于标距的 0.4 倍（单位为 mm/min）。

拉断力除以镀锌钢线截面积（由实测直径计算）计算得到的抗拉强度应不小于表 3.1-13、表 3.1-14 或表 3.1-15 相应栏的规定值。

如果试验标距长度已按 1%伸长时的应力试验的规定标在钢线上，那么该试件可接着用于伸长率试验。

（3）韧性试验。除非订货时购买方与制造方已达成协议，选择伸长率试验还是扭转试验由制造方决定，并且这种选择应不损害钢线使用的质量。

1）伸长试验。从每个试样上截取一个试件，测量其无负荷条件下的伸长率。试件应按 1%伸长时的应力试验的规定标出标距，并按拉力试验的规定施加负荷。钢线拉断后，应将试件的断口小心对齐，测量最终的标距。伸长率以标距的增量与原始标距之比的百分数表示。

试件的断口必须在标距之内，试验才有效。

伸长率应不小于表 3.1-13 或表 3.1-14 或表 3.1-15 相应栏的规定值。

对于控制质量的例行试验，可以采用按系数校正的标距（见表 3.1-13、表 3.1-14 或表 3.1-15 的注）。但如果有异议，则应强制采用 250mm 标距。

2）扭转试验（不适用 B 级镀锌钢线）。该试验可作为伸长率试验的替代试验。从每个试样上截取一个试件进行扭转试验。试件应夹在两个钳口中，其中一个在试验时应能纵向自由移动。试验时应在试件上施加一个很低的张力，其数值不超过钢线拉断力的 2%，然后使其中一个钳口旋转，直至试件轴向扭断为止。同时用计数器或其他合适的装置指示扭转次数。扭转速度应不超过 60r/min，长度为镀锌钢线直径 100 倍的试件，其扭转次数应不小于表 3.1-13 或表 3.1-14 或表 3.1-15 相应栏的规定值。

3）卷绕试验。从每个镀锌钢线试样上截取一个试件，以不超过 15r/min 的速度在芯轴上紧密卷绕 8 圈（芯轴直径规定在表 3.1-13 或表 3.1-14 或表 3.1-15 的相应栏中），镀锌钢线应不断裂。

4.1.5.2 镀锌层试验

（1）镀锌层质量的测定。镀锌层的质量可用气体容积法或重量法测定。前者具有精确度高、速度快的优点。因此对能方便地放在测量设备中进行试验的所有规格的镀锌钢线来说，可优先采用气体容积法作为例行试验方法。如果有异议，应采用重量法作为仲裁试验方法。

镀锌层质量应不小于表 3.1-12 规定的相应的数值。

1）气体容积法。

a. 原理。测定镀锌质量的气体容积法，其依据的原理是溶解在酸中的金属总会释放出一定量的氢气，氢气数量与溶解的金属量成正比，也就是上述金属的化学当量。

在温度为 0℃、压力为 101.3kPa 时，1g 释放出 0.343L 氢气。

如果是非常粗的镀锌钢线，可能会有试样制备和玻璃量管损坏的问题。因此这一测量方法通常只适用于最大直径为 5mm 的镀锌钢线。

b. 试剂。应使用下列试剂：氯化锑溶液，制备方法是将 20g 二氧化锑或 32g 三氯化锑溶解在 1000mL 盐酸中（密度在 1.16～1.18 之间）。

把 5mL 氯化锑溶液加入 100mL 盐酸中配制成锌层溶解液。

也可使用 ISO1460 所述的锌层溶解液作为替代试剂。

c. 试验装置。试验装置包括一根 100mL 玻璃量管。玻璃量管的顶端和底端各有一个管塞，在底端有一根橡皮管与一容器连接。

100mL 量管应刻有至少 0.5mL 的细分度。如果是小尺寸的钢线，例如直径小于 1.5mm，则在正常试验时使用长度基本相同的 50mL 量管更方便。该量管刻有至少 0.2mL 的细分度。

d. 试件。从校直的未损伤的钢线上准确的截取一段规定长度的试件（误差不大于 1%）。最合适的试件长度取决于量管的尺寸、钢线的直径和预计的镀层质量。表 3.1-17 规定的长度通常能方便试验。

表 3.1-17 试 件 长 度

镀锌钢线直径（mm）		试样长度（mm）		镀锌钢线直径（mm）		试样长度（mm）	
以上	到及包括	100mL 量管	50mL 量管	以上	到及包括	100mL 量管	50mL 量管
1.24	1.8	100	75	3.6	5.50	50	—
1.8	3.6	75	—				

e. 试验步骤。将锌层溶解液注入容器中。当容器在抬高位置时，锌层溶解液完全充满量管，并留一小部分在容器中。

试验过程中，调节容器的高度位置，使锌层溶解液正好充满量管至上管塞，此时下管塞关闭。将截成规定长度的试件放入量管中，立刻关闭上管塞。

镀锌层迅速溶解，并释放出氢气，继续试验直至氢气释放完毕（几个小气泡除外）。然后将支架上的容器抬高放在量管的旁边，使量管和容器中锌层溶解液处在同一水平面，从量管的刻度上读出氢气的体积。

试验结束时，打开上管塞，把容器降到下管塞以下的位置排出量管中的全部锌层溶解液。再次按上述步骤重复进行试验之后打开下管塞取出试件，再关闭。

如果有必要使用较长的试件，将试件迅速放入量管中可能有困难，这时可将试件分成两段从上管塞同时投入。

清洗除去镀锌层的钢线，擦干后测量直径，精确到 0.01mm。

f. 计算。镀锌层单位面积质量按下式计算

$$\text{单位面积镀锌层质量} = (V/dl)f$$

式中：V 为释放的氢气体积，mL；d 为除去镀锌层后的钢线直径；l 为试件长度；f 为系数。如果试件长度和直径的单位为 mm，且 f 等于 866，得出的镀锌层单位面积质量的单位为 g/m^2。

g. 温度和气压的校正。系数（f）是在温度为 20℃、气压为 101.3kPa 的条件下计算出来的。如果大气压在 98.7kPa 到 104.0kPa 的范围之外，或者如果温度在 18～22℃的范围之外，应使用表 3.1-18 规定的修正值。如果根据气压和温度查得的修正值在 0.98～1.02 之间（见表 3.1-18 的划线区），则不必使用修正值。

表 3.1-18　　温度和压力的修正值

温度（℃）	大气压力（kPa）														
	69.3	72.0	74.7	77.3	80.0	82.7	85.3	88.0	90.7	93.3	96.0	98.7	101.3	104.0	166.7
	或气压表高度（mmHg）														
	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800
12	0.703	0.730	0.758	0.784	0.811	0.839	0.866	0.892	0.920	0.947	0.974	1.001	1.028	1.055	1.082
14	0.698	0.725	0.752	0.779	0.806	0.833	0.860	0.886	0.914	0.940	0.967	0.994	1.021	1.048	1.075
16	0.694	0.720	0.747	0.774	0.800	0.827	0.854	0.880	0.908	0.934	0.960	0.988	1.014	1.040	1.068
18	0.689	0.715	0.742	0.768	0.795	0.822	0.848	0.874	0.901	0.927	0.954	0.981	1.007	1.033	1.060
20	0.684	0.710	0.737	0.763	0.789	0.816	0.842	0.868	0.895	0.921	0.947	0.974	1.000	1.026	1.053
22	0.679	0.705	0.732	0.758	0.783	0.810	0.836	0.862	0.889	0.915	0.940	0.967	0.993	1.019	1.046
24	0.674	0.700	0.727	0.752	0.778	0.805	0.830	0.856	0.882	0.908	0.934	0.960	0.986	1.012	1.038
26	0.670	0.696	0.722	0.748	0.773	0.800	0.825	0.851	0.877	0.903	0.928	0.955	0.980	1.005	1.032
28	0.666	0.691	0.717	0.742	0.769	0.794	0.819	0.845	0.871	0.896	0.921	0.947	0.973	0.998	1.025
30	0.661	0.687	0.713	0.738	0.763	0.789	0.814	0.839	0.865	0.891	0.916	0.942	0.967	0.992	1.018

当试验结果与规定的最小值之差在 $5g/m^2$ 范围之内，假如必须作负修正，则应检查此时的大气压和温度。

当气候或海拔影响试验条件，则应对系数（f）进行修正。在高海拔下，使用容积大于 50mL 或 100mL 的量管会更方便。

表 3.1-18 给出了温度和气压的修正值。

2）重量法。

a. 原理。从每个镀锌钢线上截取一个试件，用手校直，浸入合适的除油溶剂中清洗，然后用一干净的软布擦干。称重试件，精确到 0.01g。试件质量（单位为 g）应不小于其直径（单位为 mm）的 4 倍。为方便除去镀锌层，可弯曲试件。所使用的试剂在气体容积法的试剂中规定。

b. 除去镀锌层。将试件完全浸入适量的锌层溶解液中除去镀锌层，锌层溶解液应符合气体容积法中试剂——氯化锑溶液和盐酸或 ISO 1460 规定。锌层溶解液可重复使用，直到用来除去锌的时间相当长以致给试验带来不便时，才需添加氯化锑溶液。锌层溶解液的温度应始终不超过 40℃。

一次测定需要 100mL 锌层溶解液，注入直径 50mm、深 150mm 的玻璃容器中。在每 100mL 锌层溶解液中任何情况下浸入的试件数目不应超过 3 个。

镀锌钢线试件上激烈的化学反应一停止，试件应立即从酸中取出。用流动水彻底清洗并擦干。然后在互相垂直的方向上测量 2 次，取其平均值作为钢线的直径，修约至 0.01mm。最后称量除去镀锌层的试件质量，精确到 0.01g。

c. 计算。除去镀锌层的钢线，单位表面积的镀锌层质量应按下式计算

$$\text{除去镀锌层的钢线单位表面积的镀锌层质量} = 1950dr \ (g/m^2)$$

式中：d 为除去镀锌层后的钢线直径，mm；r 为（原始质量－除去锌后的质量）/除去锌后的质量。

（2）镀锌层附着性试验。从每个镀锌钢线试样上截取一个试件，以不超过 15r/min 的速度在圆形芯轴上紧密卷绕 8 圈，镀锌钢线直径为 3.50mm 及以下时，芯轴直径为镀锌钢线直径的 4 倍；镀锌钢线直径为 3.50mm 以上时，芯轴直径为镀锌钢线直径的 5 倍。

镀锌层应牢固地附着在钢线上而不开裂，或用手指擦锌层不会产生脱落的起皮。

（3）镀锌层连续性试验。从每个镀锌钢线试样上截取一个试件，用肉眼观察镀锌层应没有孔隙。镀锌层应较光洁、厚度均匀，并与良好的商品实践相一致。

4.2　架空地线用镀锌钢绞线[1]

架空地线用镀锌钢绞线的性能要求，如表 3.1-19 所示。

[1] 参考 GB/T 1179－1999《圆线同心绞架架空导线》。

表 3.1-19 架空地线用 JG1A、JG1B、JG2A 和 JG3A 钢绞线性能

规格号	面积 (mm^2)	单线根数 n	直径 单线 (mm)	直径 绞线 (mm)	单位长度质量 (kg/km)	额定抗拉力 JG1A (kN)	JG1B (kN)	JG2A (kN)	JG3A (kN)	直流电阻 20℃ (Ω/km)
4	27.1	7	2.22	6.66	213.3	36.3	33.6	39.3	43.9	7.144 5
6.3	42.7	7	2.79	8.36	335.9	55.9	51.7	60.2	67.9	4.536 2
10	67.8	7	3.51	10.53	533.2	87.4	80.7	93.5	103.0	2.857 8
12.5	84.7	7	3.93	11.78	666.5	109.3	100.8	116.9	128.8	2.286 2
16	108.4	7	4.44	13.32	853.1	139.9	129.0	199.7	164.8	1.786 1
16	108.4	19	2.70	13.48	857.0	142.1	131.2	152.9	172.4	1.794 4
25	169.4	19	3.37	16.85	1339.1	218.6	201.6	238.9	262.6	1.148 4
40	271.1	19	4.26	21.31	2142.6	349.7	322.6	374.1	412.1	0.717 7
40	271.1	37	3.05	21.38	2148.1	349.7	322.6	382.3	420.2	0.719 6
63	427.0	37	3.83	26.83	3383.2	550.8	508.1	589.3	649.0	0.456 9

4.3 锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线❶

4.3.1 适用范围

适用于制造架空绞线用钢丝；适用于架空电力地线、通信电缆、吊架、悬挂、栓系及固定物件等用的钢绞线。

该合金镀层产品适用于要求耐腐蚀、承受拉力等工作场合。

4.3.2 分类

钢丝按抗拉强度分为三级：普通强度、高强度和特高强度。

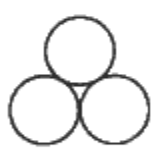
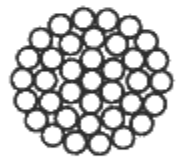
钢丝按镀层重量分为三级：A、B、C。

钢绞线按断面结构分为四种，如表 3.1-20 所示。

钢绞线按公称抗拉强度（MPa）分为八级：420，670，750，1170，1270，1370，1470，1570。

钢绞线用钢丝按镀层重量分为四级：A、B、C、D。

表 3.1-20 钢绞线结构

断面				
结构	1×3	1×7	1×19	1×37

4.3.3 钢丝直径及允许偏差（见表 3.1-21）

表 3.1-21 钢丝直径及允许偏差

直径（mm）	允许偏差（mm）
>1.24～2.25	±0.03
>2.254～3	±0.04
>3～3.5	±0.05
>3.5～5.5	±0.06

注 偏差值应用于检验镀层钢丝的镀层均匀部位。

4.3.4 钢丝技术要求

（1）材料。钢丝用盘条应符合 GB/T 4354—1994《优质碳素钢热轧盘条》的规定，牌号由钢丝生产厂选择。

热镀用锌—5%铝—混合稀土合金锭的化学成分应符合表 3.1-22 的规定。

表 3.1-22 锌—5%铝—混合稀土合金锭的化学成分

Al (%)	Ce+La (%)	Fe 不大于 (%)	Si 不大于 (%)	Pb 不大于 (%)	Cd 不大于 (%)	Sn 不大于 (%)	其他元素每种不大于 (%)	其他元素总量不大于 (%)	Zn (%)
4.7～6.2	0.03～0.10	0.075	0.015	0.005	0.005	0.002	0.02	0.04	余量

对于一步镀法，合金镀槽内熔体中的铝含量应控制在 4.2%～6.2%；对于两步镀法，先镀锌（热镀锌或电镀锌），然后镀锌—5%铝—混合稀土合金，合金镀槽内熔体中的铝含量允许达到 7.2%，以防止镀液中铝含量贫化。

钢丝镀层中的铝含量不小于 4.2%。

（2）接头。在最终冷拉前的任何工序中可用电阻对焊接头或闪光焊接头，但最终冷拉后的镀前钢丝不能再接头。

焊接设备和工艺应能保证有焊接部位的成品钢丝试样的极限抗拉强度不小于 1%伸长时规定最小应力的 96%。焊接部位不要求满足 1%伸长时的应力、伸长率要求，且不要求作缠绕试验。

有镀层的成品钢丝不应有任何类型的接头。

（3）力学性能。钢丝的力学性能应符合表 3.1-23 的规定。

除非订货时购买方与制造方已达成协议，在保证钢丝使用质量的前提下选择伸长率试验还是扭转试验由制造方决定。

从钢丝试料上截取一个试样，以不超过 15r/min 的速度在芯棒上紧密卷绕 8 圈（芯棒直径见表 3.1-23 相应栏中），钢丝应不断裂。

（4）镀层。钢丝镀层质量应符合表 3.1-24 的规定。

普通强度级钢丝镀层质量设为二级：A、B；高强度级钢丝镀层质量设为三级：A、B、C；特高强度级钢丝镀层质量只有 A 级。

钢丝镀层的附着性试验：

钢丝以不超过 15r/min 的速度在表 3.1-25 规定直径的芯棒上紧密螺旋缠绕至少 8 圈，镀层不得开裂或起层到能用手指擦掉的程度。

❶ 参考 GB/T 20492—2006《锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线》。

表 3.1-23　　钢丝力学性能

强度级别	公称直径（mm）	抗拉强度不小于（MPa）			1%伸长时应力不小于（MPa）			断后伸长率 L_0=250mm 不小于（%）			扭转次数不小于（次/360°）			缠绕试验芯棒直径与钢线公称直径之比
		A级镀层	B级镀层	C级镀层	A级镀层	B级镀层	C级镀层	A级镀层	B级镀层	C级镀层	A级镀层	B级镀层	C级镀层	
普通强度	>1.24～2.25	1340	1240	—	1170	1100	—	3.0	3.0	—	16	—	—	1
	>2.25～2.75	1310	1210	—	1140	1070	—	3.0	3.5	—	16	—	—	1
	>2.75～3	1310	1210	—	1140	1070	—	3.5	3.5	—	16	—	—	1
	>3～3.5	1290	1190	—	1100	1000	—	3.5	3.5	—	14	—	—	1
	>3.5～4.25	1290	1190	—	1100	1000	—	4.0	4.0	—	12	—	—	1
	>4.25～4.75	1290	1190	—	1100	1000	—	4.0	4.0	—	12	—	—	1
	>4.75～5.5	1290	1190	—	1100	1000	—	4.0	4.0	—	12	—	—	1
高强度	>1.24～2.25	1450	1380	1310	1310	1240	1170	2.5	2.5	2.5	16	—	—	3
	>2.25～2.75	1410	1340	1280	1280	1210	1140	2.5	2.5	2.5	16	—	—	3
	>2.75～3	1410	1340	1280	1280	1210	1140	3.0	3.0	3.0	16	—	—	4
	>3～3.5	1410	1340	1280	1240	1170	1100	3.0	3.0	3.0	14	—	—	4
	>3.5～4.25	1380	1280	1240	1170	1100	1070	3.0	3.0	3.0	12	—	—	4
	>4.25～4.75	1380	1280	1240	1170	1100	1070	3.0	3.0	3.0	12	—	—	4
	>4.75～5.5	1380	1280	1240	1170	1100	1070	3.0	3.0	3.0	12	—	—	4
特高强度	>1.24～2.25	1620	—	—	1450	—	—	2.0	—	—	14	—	—	4
	>2.25～2.75	1590	—	—	1410	—	—	2.0	—	—	14	—	—	4
	>2.75～3	1590	—	—	1410	—	—	2.5	—	—	12	—	—	5
	>3～3.5	1550	—	—	1380	—	—	2.5	—	—	12	—	—	5
	>3.5～4.25	1520	—	—	1340	—	—	2.5	—	—	10	—	—	5
	>4.25～4.75	1520	—	—	1340	—	—	2.5	—	—	10	—	—	5
	>4.75～5.5	1500	—	—	1270	—	—	2.5	—	—	10	—	—	5

注　伸长率的最小值是对 250mm 标距而言。如采用其他标距，则这些数值应使用 650/（标距＋400）这个系数进行校正。

表 3.1-24　　钢丝镀层质量

钢丝公称直径（mm）	镀层质量（g/m²）不小于		
	A级	B级	C级
>1.24～1.5	185	370	555
>1.5～1.75	200	400	600
>1.75～2.25	215	430	645
>2.25～3	230	460	690
>3～3.5	245	490	735
>3.5～4.25	260	520	780
>4.25～4.75	275	550	825
>4.75～5.5	290	580	870

表 3.1-25　　钢丝镀层附着性试验芯棒直径

钢丝直径（mm）	芯棒直径与钢丝直径之比
>1.24～2.25	3
>2.25～3.5	4
>3.5～5.5	5

（5）试验。钢丝镀层应连续、均匀，不应有影响使用的表面缺陷。其色泽在空气中暴露后可呈青灰色。

1）化学成分测定。合金锭和镀槽内合金熔体化学成分的测定应按照 YS/T 310—1995《热镀用锌合金锭》附录 A、B、C 和 GB/T 12689.1《锌及锌合金化学分析方法》的规定进行，钢丝镀层中铝含量的测定按下列方法进行。

钢丝镀层中铝含量的测定方法：

a. 方法提要。在微酸性溶液中加入过量的 EDTA 标准溶液，使铁、锌、铜等元素与之形成络合物，然后在乙酸存在下，煮沸使铝也全部形成络合物，以二甲酚橙为指示剂，用硝酸铅标准溶液回滴过量的 EDTA。加入氟化物使 AL—EDTA 解蔽，释放出与铝等量的 EDTA，再用硝酸铅标准滴定溶液滴定，由此计算铝的重量百分含量。

b. 试验溶液。

（a）氟化钾（$KF \cdot 2H_2O$）。

（b）去镀层盐酸缓蚀液：HCl（1＋1）与六次甲基四胺（3%）等体积混合。

（c）盐酸（1＋1）。

（d）氨水（1＋1）。

（e）乙酸铵溶液（50%）。

（f）乙酸—乙酸钠缓冲溶液（pH＝5.5）：称取 200g 乙酸钠（含 3 个结晶水），用水溶解，加入 9mL 冰乙酸，然后以水稀至 1000mL。

（g）EDTA 标准溶液，c（EDTA）＝0.05mol/L：称取 19gEDTA（含 2 个结晶水）于 500mL 烧杯中，加水溶解后，移入 1000mL 容量瓶中，以水稀至刻度。

（h）硝酸铅标准滴定溶液，$c[Pb(NO_3)_2]$＝0.025mol/L：称取硝酸铅 8.3g，以水溶解，移至 1000mL 容量瓶中，稀至刻度，标定。

(i) 刚果红试纸。

(j) 二甲酚橙指示剂(0.25%)。

c. 分析步骤。

(a) 试样溶解。取 6 根 5cm 长试样，表面先用汽油擦净晾干，再用无水乙醇擦净晾干，放入烘箱内以 105℃烘 30min，放在干燥器内冷却 30min。称重得 g_1，随后放入 100mL 去镀层液Ⅱ-b) 中去除镀层，用蒸馏水洗净试样，再用无水乙醇擦净试样用电热风吹干，称重得 g_2，合金重量 g_1-g_2，随后把去镀层液移入 200mL 容量瓶中，以水稀至刻度，摇匀备用。

(b) 移取 25.00mL 溶液[Ⅱ-a)]于 250mL 锥形瓶中，加入一小块刚果红试纸，滴加氨水[Ⅱ-d)]至试纸变红，再滴加盐酸[Ⅱ-c)]至试纸变蓝，然后加入 25mL EDTA 标准溶液[Ⅱ-g)]摇匀。加 3mL 乙酸铵溶液[Ⅱ-e)]，煮沸 3min，冷却，加 10mL 缓冲溶液[Ⅱ-f)]，4～5 滴二甲酚橙指示剂[Ⅱ-j)]，以硝酸铅标准滴定溶液[Ⅱ-h)]滴定至溶液恰呈红色(不计数，但不能过量)。加入 1g 氟化钾[Ⅱ-a)]，煮沸 2～3min，冷后补加一滴二甲酚橙指示剂[Ⅱ-j)]，用硝酸铅标准滴定溶液[Ⅱ-h)]滴定至红色为终点。

d. 分析结果的计算。按下式计算铝的百分含量

$$\mathrm{Al}(\%)=\frac{cV\times 0.026\,98}{\Delta G\times 25/200}\times 100\%$$

式中：c 为硝酸铅标准滴定溶液[Ⅱ-h)]的实际浓度，mol/L；V 为滴定释放出的 EDTA 消耗硝酸铅标准滴定溶液[Ⅱ-h)]的体积，mL；ΔG 为合金的重量，g；0.02698 为与 1.00mL 硝酸铅标准滴定溶液{$c[Pb(NO_3)_2]=1.00$mol/L}相当的铝的重量，g；25/200 为分液率；ΔG 为 g_1-g_2 并扣除掉退镀时带入的铁后的数值。

2) 1%伸长时应力试验。将试样夹在拉力机夹头中，首先按表 3.1-26 规定施加相应的初应力，将引伸仪装在试样上，然后根据标距长度按表 3.1-26 规定调整引伸仪起始值，均匀地增加负荷到引伸仪指示出标距的 1%时为止。此时，将在试验机上读出的负荷除以钢丝的实际截面积，即得 1%伸长时应力。

经测定后的试样，可继续测定抗拉强度和伸长率。

表 3.1-26　　1%伸长时应力试验

钢丝实际直径 (mm)	初始应力 (MPa)	引伸仪起始值 (mm)			
		$L_0=250$mm	$L_0=200$mm	$L_0=100$mm	$L_0=50$mm
≤2.25	100	0.125	0.100	0.050	0.025
>2.25～3.00	200	0.250	0.200	0.100	0.050
>3.00～4.75	300	0.375	0.300	0.150	0.075
>4.75	400	0.500	0.400	0.200	0.100

3) 钢丝直径的测量。在同一截面互成 90°的方向上测量，取两次测量的平均值作为钢丝的直径。

(6) 钢绞线尺寸、允许偏差和最小破断拉力。钢绞线的直径应符合表 3.1-27 的规定，其允许偏差为±3%；钢绞线用钢丝直径允许偏差应符合表 3.1-28 的规定。钢绞线用 C、D 级镀层钢丝在钢丝镀层均匀的部位测定尺寸偏差。

表 3.1-27　　钢绞线的直径和最小破断拉力

结　构	钢绞线用钢丝直径 (mm)	钢绞线直径 (mm)	钢绞线横截面积 (mm^2)	抗拉强度 (MPa)								参考质量 (kg/km)
				420	670	750	1170	1270	1370	1470	1570	
				钢绞线最小破断拉力 (kN) 不小于								
1×3	2.9	6.2	19.82	7.66	12.22	13.68	21.33	23.16	24.98	26.80	28.63	160
	3.2	6.4	24.13	9.32	14.87	16.65	25.97	28.19	30.41	32.63	34.85	195
	3.5	7.5	28.86	11.15	17.79	19.91	31.06	33.72	36.38	39.03	41.69	233
	4	8.6	37.70	14.57	23.24	26.01	40.58	44.05	47.52	50.99	54.45	304
1×7	1	3	5.50	2.13	3.39	3.80	5.92	6.43	6.93	7.44	7.94	43.7
	1.2	3.6	7.92	3.06	4.88	5.46	8.53	9.25	9.98	10.71	11.44	62.9
	1.4	4.2	10.78	4.17	6.64	7.44	11.60	12.60	13.59	14.58	15.57	85.6
	1.6	4.8	14.07	5.44	8.67	9.71	15.14	16.44	17.73	19.03	20.32	112
	1.8	5.4	17.81	6.88	10.98	12.29	19.17	20.81	22.45	24.09	25.72	141
	2	6	21.99	8.50	13.55	15.17	23.67	25.69	27.72	29.74	31.76	175
	2.2	6.6	26.61	10.28	16.40	18.36	28.65	31.10	33.55	36.00	38.45	210
	2.6	7.8	37.17	14.36	22.91	25.65	40.01	43.43	46.85	50.27	53.69	295
	3	9	49.50	19.14	30.53	34.17	53.31	57.86	62.42	66.98	71.54	390
	3.2	9.6	56.30	21.75	34.70	38.85	60.60	65.78	70.96	76.14	81.32	447
	3.5	10.5	67.35	26.02	41.51	46.47	72.50	78.69	84.89	91.08	97.28	535
	3.8	11.4	79.39	30.68	48.94	54.78	85.46	92.76	100.1	107.4	114.7	630
	4	12	87.96	33.99	54.22	60.69	94.68	102.8	110.9	119.0	127.0	698
1×19	1.6	8	38.20	14.44	23.03	25.78	40.22	43.66	47.10	50.54	53.98	304
	1.8	9	48.35	18.28	29.16	32.64	50.91	55.26	59.62	63.97	68.32	385
	2	10	59.69	22.56	35.99	40.29	62.85	68.23	73.60	78.97	84.34	475
	2.2	11	72.20	27.31	43.57	48.77	76.08	82.58	89.00	95.58	102.09	569
	2.3	11.5	78.94	29.84	47.60	53.28	83.12	90.23	97.33	104.4	111.5	628
	2.6	13	100.9	38.14	60.84	68.11	106.2	115.3	124.4	133.5	142.6	803
	2.9	14.5	125.5	47.44	75.68	84.71	132.2	143.4	154.7	166.0	177.3	999
	3.2	16	152.8	57.76	92.14	103.1	160.9	174.7	188.4	202.2	215.9	1220
	3.5	17.5	182.8	69.10	110.2	123.4	192.5	208.9	225.4	241.8	258.3	1460
	4	20	238.8	90.27	144.0	161.2	251.5	272.9	294.4	315.9	337.4	1900

续表

结 构	钢绞线用钢丝直径（mm）	钢绞线直径（mm）	钢绞线横截面积（mm^2）	抗拉强度（MPa）								参考质量（kg/km）
				420	670	750	1170	1270	1370	1470	1570	
				钢绞线最小破断拉力（kN）不小于								
1×37	1.6	11.2	74.39	26.56	42.37	47.42	73.98	80.30	86.63	92.95	99.27	595
	1.8	12.6	94.15	33.61	53.62	60.02	93.63	101.6	109.6	117.6	125.6	753
	2	14	116.2	41.48	66.18	74.08	115.6	125.4	135.3	145.2	155.1	930
	2.3	16.1	153.7	54.87	87.53	97.98	152.9	165.9	179.0	192.0	205.1	1230
	2.6	18.2	196.4	70.11	111.8	125.2	195.3	212.0	228.7	245.4	262.1	1570
	2.9	20.3	244.4	87.25	139.2	155.8	243.1	263.8	284.6	305.4	326.2	1950
	3.2	22.4	297.6	106.2	169.5	189.7	296.0	321.3	346.6	371.9	397.1	2380
	3.5	24.5	356.0	127.1	202.7	227.0	354.0	384.3	414.6	444.8	475.1	2050
	4	28	465.0	166.0	264.8	296.4	462.4	502.0	541.5	581.0	620.5	3720

注 根据用户需要，可生产表3.1-27中未列入的中间规格钢绞线，技术要求可在相邻规格的基础上由供需双方商定。

表3.1-28 钢绞线用钢丝直径允许偏差

钢绞线中镀层钢丝直径（mm）	允许偏差（mm）
≥1～1.5	±0.05
>1.5～2.3	±0.08
>2.3～3	±0.10
>3	±0.13

（7）钢绞线技术要求。

1）绞制（捻制）。除非另有规定，钢绞线最外层捻向应为右向，相邻层捻向相反。所有钢丝应在均匀张力下捻制，钢绞线捻制应足够紧密以保证在10%最小破断拉力的张力作用下直径没有明显减小。整条钢绞线无跳线、蛇形等缺陷。

除非另有规定，钢绞线的捻距倍数应符合表3.1-29的规定。

表3.1-29 钢绞线节距（捻距）倍数

结 构	节 距 倍 数		
	内	中	外
1×3	—	—	14～20
1×7	—	—	≤14
1×19	≤14	—	≤14
1×37	≤14	≤14	≤14

钢绞线切断后应不松散。

当需方有要求时，可采用预成形工艺生产钢绞线。

2）接头。钢丝冷拉前允许电阻对焊或闪光焊。钢绞线用钢丝接头应符合以下规定：1×3结构钢绞线，其单根钢丝不得有任何接头；其他结构钢绞线内钢丝接头应用电阻焊或闪光焊对接，任意两接头间距不得小于50m。

钢绞线内钢丝焊接时，应尽量减少损坏钢丝镀层。所有接头应接合完好并镀锌或锌合金，使接头处有一定的防腐性能。

除非需方特许，成品钢绞线任何长度上不得焊接。

架空地线用钢绞线，捻制绞线的镀层钢丝应无任何接头。

3）钢绞线最小破断拉力。钢绞线最小破断拉力应符合表3.1-27的规定。

经供需双方协商，可通过测试钢绞线内钢丝的破断拉力总和来计算钢绞线最小破断拉力：

钢绞线最小破断拉力＝钢绞线内钢丝的破断拉力总和×换算系数

换算系数：1×3、1×7结构为0.92；1×19结构为0.90；1×37结构为0.85。

4）钢绞线断裂总伸长率。标距为610mm钢绞线的断裂总伸长率应不小于表3.1-30的规定。钢绞线伸长率试验应在没有钢丝对焊接头的钢绞线段上进行。

表3.1-30 各级别钢绞线断裂总伸长率

钢绞线标称抗拉强度（MPa）	610mm断裂总伸长率（%）
420	10
670	8
750、1170、1270、1370	5
1470、1570	4

5）镀层。

a. 镀层质量。钢绞线用钢丝镀层质量应符合表3.1-31的规定。

表3.1-31 钢绞线用钢丝镀层质量

钢绞线用钢丝公称直径（mm）	镀层质量不小于（g/m^2）			
	A级	B级	C级	D级
1	46	122	244	366
1.2	46	122	244	366
1.4	46	122	244	366
1.6	46	153	305	458
1.8	46	153	305	458
2	92	183	366	549
2.2	92	183	366	549
2.3	92	214	427	641
2.6	92	244	488	732
2.9	92	244	488	732
3	92	244	488	732
3.2	92	259	519	778
3.5	122	275	549	824
3.8	122	275	549	824
4	122	275	549	824

注 A级镀层仅适用于420MPa强度等级的钢绞线。

根据用户需要，可生产表中未列入的中间规格钢绞线，技术要求可在相邻规格的基础上由供需双方商定。

b. 镀层附着性。钢绞线用合金镀层钢丝以不超过15r/m的速度在等于3倍钢丝公称直径的芯棒上紧密螺旋缠

绕至少 6 圈，镀层不得开裂或起层到能用手指擦掉的程度。

6）钢绞线用钢丝韧性。钢绞线用钢丝以不超过 15r/m 的速度绕一规定尺寸的芯棒上紧密螺旋缠绕至少 8 圈应不断裂。420MPa、670MPa 级钢绞线用钢丝的芯棒直径等于钢丝公称直径；750MPa、1170MPa、1270MPa、1370MPa、1470MPa、1570MPa 级钢绞线用钢丝的芯棒直径等于公称直径的 3 倍。

4.4 美国标准钢芯铝绞线用锌—5％铝—混合稀土合金镀层钢线●

4.4.1 适用范围

本标准适用于制造钢芯铝绞线用的机械加强的圆形的锌—5％铝—混合稀土合金镀层钢线，这种钢线有三个镀层级别。本标准的线径范围为 1.60～4.80mm。

4.4.2 镀层级别

成品钢线的镀层分 A、B 和 C 三个级别，见表 3.1-32。

表 3.1-32 锌—5％铝—稀土合金镀层

镀层钢线直径	镀层钢线镀层质量(最小)(未镀的线表面)(g/m^2)		
(mm)	A 类	B 类	C 类
1.60～1.90	210	420	630
>1.90～2.30	220	440	660
>2.30～2.70	230	460	690
>2.70～3.10	240	480	720
>3.10～3.50	260	520	780
>3.50～3.90	270	540	810
>3.90～4.50	275	550	825
>4.50～4.80	300	600	900

4.4.3 材料

基体材料是用平炉、电炉或碱性氧气熔炼法生产的钢。

线材经冷拉，并镀锌—5％铝—混合稀土合金，使产品达到要求的性能。

4.4.4 化学成分

钢必须符合表 3.1-33 规定的要求。

表 3.1-33 钢的化学成分

元 素	成分（％）
碳	0.60～0.85
锰	0.50～1.10
磷（最大）	0.035
硫（最大）	0.045
硅	0.10～0.35

锌—5％铝—混合稀土合金锭应符合 ASTM B750 的规定。

对两步法镀制工艺，第一层镀的是锌（热镀锌或电镀锌），第二层才镀锌—铝—混合稀土合金，最终槽子中的铝含量可达 7.2％，以预防槽子中铝含量的减少。

4.4.5 钢线技术要求

（1）1％伸长应力、抗拉强度和伸长率（见表 3.1-34）。在测定 1％伸长应力时的起始值如表 3.1-35 所示。

表 3.1-34 1％伸长应力、抗拉强度和伸长率的要求

直 径 (mm)	1％伸长时应力，最小 (MPa)			抗拉强度，最小 (MPa)			伸长率，最小，标距 250mm (％)		
	A 级	B 级	C 级	A 级	B 级	C 级	A 级	B 级	C 级
1.00～2.30	1310	1240	1170	1450	1380	1310	3.0	3.0	3.0
>2.30～3.05	1280	1210	1140	1410	1340	1280	3.5	3.0	3.0
>3.05～3.60	1240	1170	1100	1410	1340	1280	4.0	3.0	3.0
>3.60～4.80	1170	1100	1070	1380	1280	1240	4.0	4.0	4.0

表 3.1-35 测定 1％伸长应力时的起始值

直径 (mm)	初始应力 (MPa)	引伸仪起始值 (mm/mm)
1.00～2.30	100	0.000 5 (0.05％伸长)
>2.30～3.05	190	0.001 0 (0.10％伸长)
3.05～4.80	290	0.001 5 (0.15％伸长)

（2）缠绕性能。当锌—5％铝—混合稀土合金镀层钢线以不超过 15r/min 的转速，在等于 2 倍规定钢线直径(±5％)的芯棒上紧密螺旋缠绕至少 8 圈时，以试件为代表的材料应不断裂。

（3）镀层质量。对镀层质量的要求如表 3.1-32 所示。

镀层的试验应按 ASTM A90/A90M 试验方法进行。

（4）镀层的附着力。锌—5％—混合稀土合金镀层钢线应能经受以不超过 15r/min 的速度，在表 3.1-36 规定直径的芯棒上紧密螺旋缠绕而镀层不裂开或起层，其程度以用手指擦不掉为准。在附着力试验中由于镀层线表面的机械摩擦形成的锌—5％铝—混合稀土合金镀层小颗粒疏松或脱落不能作为判废的理由。

（5）接头。在成品钢线中不得有接头。在最终冷拉制前的任何工序中可用电阻对焊接头或闪光焊接头。

焊接设备和焊接工序应达到这样的要求：能用试验证明，包含焊接部分的成品钢线试样的抗拉强度应不低于所规定的 1％伸长最小应力的 96％。

焊接部分不要求达到 1％伸长应力、伸长率的缠绕性能的规定。

表 3.1-36 附着力试验的芯棒尺寸

规定的钢线直径 (mm)	芯棒直径与钢线直径之比
1.60～2.30	3
>2.30～3.05	4
>3.05～4.80	5

（6）密度和电阻率。为了计算单位长度的质量、截面积等，锌—5％铝—混合稀土合金镀层钢线 20℃时的密度应取 7780kg/m^3。锌—5％铝—混合稀土合金镀层钢线的最大电阻率不作保证，但可取典型值 0.191 57Ω·mm^2/m 用于计算。对电导率或电阻率的其他单位的换算，可参照 ASTM B193 试验方法标准。

（7）直径与允许偏差。直径用十进制小数毫米表示，保留小数点后两位。对直径的测量和直径公差，规定的直径应修约精确到 0.01mm。

在同一截面上测量最大直径和最小直径，精确到 0.01mm，两者的平均值与规定直径之差不得大于表 3.1-37 所示的允许偏差。

（8）表面状态。锌—5％铝—混合稀土合金镀层应合适地光滑、连续，合适地厚度均一，不得有不符合商业惯例的表面缺陷。

表 3.1-37 锌—5％铝—混合稀土合金镀层钢线直径的允许偏差

标称直径 (mm)	允许偏差（mm）	
	正	负
1.60～2.30	0.04	0.03
>2.30～3.05	0.05	0.05

● 摘自 ASTM B 802/B802M-02《钢芯铝导线（ACSR）用锌—5％铝—混合稀土合金镀层钢丝》。

续表

标称直径（mm）	允许偏差（mm）	
	正	负
>3.05～3.60	0.08	0.05
>3.60～4.80	0.10	0.08

注 鉴于锌—5%铝—混合稀土镀层的表面，特别是用热浸镀法生产的镀层表面不是非常光滑和均匀一致的。如将本表中的公差硬搬应用于产品的不平整部分，必将发生不恰当的判废。其实，这种钢线是完全可以使用的。因此，本表中的偏差仅适用于测量镀层钢线的均匀部分。

4.5 美国标准钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线用高强度锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线❶

4.5.1 适用范围

适用于制造专用的（特殊的）由钢加强的铝绞线和铝合金绞线的、圆形的、高强度锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线，这种钢线只有一个镀层级别。本标准的线径范围为1.60～4.80mm。

4.5.2 镀层

锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线应符合表3.1-38的规定。

镀层试验应按ASTM A90/A90M标准进行。

表3.1-38 锌—5%铝—混合稀土合金镀层

镀层线规定的直径（mm）	锌—5%铝—混合稀土合金镀层质量，最小（未镀的线表面）（g/m²）
1.270～1.521	183
1.524～1.902	198
1.905～2.283	214
2.286～2.639	229
2.642～3.045	244
3.048～3.553	259
3.556～4.569	274
4.572～4.823	305

4.5.3 材料

基体材料是用平炉、电炉或碱性氧气熔炼法生产的钢。

钢线应冷拉和镀上锌—5%铝—混合稀土合金，并生产出达到要求的性能。

4.5.4 化学成分

钢必须符合表3.1-39规定的要求。

表3.1-39 化学成分要求

元 素	成 分（%）
碳	0.50～0.88
锰	0.50～1.30
磷（最大）	0.035
硫（最大）	0.045
硅	0.10～0.35

锌—5%铝—混合稀土合金锭应符合ASTM B750的规定。

对两步法镀制工艺，第一层镀的是锌（热浸镀锌或电镀锌），第二层才镀锌—5%铝—混合稀土合金，最终槽子中的铝含量可达7.2%，以预防槽子中铝含量的减少。

4.5.5 钢线技术要求

（1）锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线应符合表3.1-40规定的1%伸长应力、抗拉强度和伸长率的要求。

在测定1%伸长应力时的起始值如表3.1-41所示。

（2）缠绕性能。当锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线以不超过15r/min的转速，在等于3倍规定钢线直径（±5%）的芯棒上紧密螺旋缠绕至少8圈时，以试件为代表的材料应不断裂。

表3.1-40 1%伸长应力、抗拉强度和伸长率

规定的直径（mm）	1%伸长应力，最小（MPa）	抗拉强度，最小（MPa）	伸长率（标距250mm）（最小）（%）
1.270～2.283	1450	1620	3.0
2.286～3.045	1410	1590	3.0
3.048～3.553	1380	1550	3.5
3.556～4.823	1340	1520	3.5

表3.1-41 测定1%伸长应力的起始值

规定直径（mm）	初始应力（MPa）	引伸仪起始值（mm/mm）
1.270～2.283	97	0.000 5(0.05%伸长)
2.286～3.045	193	0.001 0(0.10%伸长)
3.048～4.823	290	0.001 5(0.15%伸长)

（3）镀层质量。对镀层质量的要求如表3.1-38所示。镀层试验应按ASTMA90/A90M试验方法进行。

（4）镀层的附着力。锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线应能经受以不超过15r/m的速度，在表3.1-42规定直径的芯棒上紧密螺旋缠绕而镀层不裂开或起层，其程度以用手指擦不掉镀层为准。在附着力试验中由于镀层线表面的机械摩擦形成的锌—5%铝—混合稀土合金镀层小颗粒疏松或脱落不能作为判废的理由。

表3.1-42 附着力试验的芯棒尺寸

规定的钢线直径（mm）	芯棒直径与钢线直径之比
1.270～2.283	3
2.286～3.553	4
3.556～4.823	5

（5）接头。对接头的要求与ASTM B802/B802M-02（与锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线）相同。

（6）密度和电阻率。对密度和电阻率的要求与ASTM B802/B802M-02（锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线）相同。

（7）直径与允许偏差。直径用十进制小数毫米表示，保留小数点后三位。对直径的测量和直径公差，规定的直径应修约精确到0.01mm。在同一截面上测量最大直径和最小直径，精确到0.01mm，两者的平均值与规定直径之差不得大于表3.1-43所示的允许偏差。

（8）表面状态。锌—5%铝—混合稀土合金镀层应合适地光滑、连续、合适地厚度均一，不得有不符合商业惯例的

❶摘自ASTM B803－02《钢芯铝绞线及钢芯铝合金绞线用高强度锌5%铝—混合稀土合金镀层钢线》。

表面缺陷。

表 3.1-43 锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线的允许偏差

规定直径（mm）	允许偏差（mm）
1.270～1.902	+0.038 −0.025
1.905～3.045	+0.051 −0.051
3.048～3.553	+0.076 −0.051
3.556～4.823	+0.102 −0.076

注 鉴于镀层的表面，特别是用热浸镀法生产的镀层表面不是非光常滑和均匀一致的。如将表中的公差硬搬应用于产品的不平整部分，必将发生不恰当的判废。其实，这种钢线是完全可以使用的。因此，本表中的偏差仅适用于测量由于热浸镀所产生的直径不均匀最小的部分。

4.6 美国标准架空地线用锌—5％铝—混合稀土合金镀层钢绞线❶

4.6.1 适用范围

适用于高强度级、超高强度级和多种用途（通用）级的冈心绞钢绞线。钢绞线由 3 股或 7 股钢线组成，锌—5%铝—混合稀土合金镀层的级别分 A、B 和 C 三种。此种钢绞线用于输电线路的架空地线或固定的线。

4.6.2 材料和制造

基体材料——是用平炉、碱性氧气熔炼法或电炉生产的钢。此种钢的质量和纯度，在拉到规定的钢线直径并镀上锌—5%铝—混合稀土合金镀层后，成品绞线和各单线（股线）应质量均匀，并达到由本标准规定的性能要求。

镀槽分析——用于连续热浸镀锌—5%铝—混合稀土合金镀层的镀槽，合金的化学成分应符合 ASTM B750 的要求。对两步法镀制工艺，第一层镀的是锌（热镀锌或电镀锌），第二层才镀锌—5%铝—混合稀土合金，最终镀槽中的铝含量可达 7.2%，以预防镀槽中铝含量的减少；化学成分的分析应按 ASTM E47 试验方法、E27 试验方法或其他试验方法进行。在有争议的情况下，以由 E47 方法所得的结果作为验收的基础；为测定锌—5%铝—混合稀土合金中的铈和镧的荧光谱测定法已有国际铅锌研究组织（International Lead Zinc Research Organization）规定，标准号为 GF-1。

4.6.3 接头

组成钢绞线用的成品单线（股线），不得有任何类型的接头；电阻对焊接头在钢线冷拉开始以前焊接是允许的，但当冷拉进行时，不得制作电阻对焊的接头；在任何长度的整根绞线中，钢绞线不得有接头或接合。

4.6.4 绞制

绞制方向为左向，绞层节距应均匀，节距不大于绞线标称直径的 16 倍。从观察者来看左向绞制应是逆时针的拧纽。绞制应足够地紧密，以保证当受力达到最小拉断力的 10%时没有直径的明显减小。

4.6.5 线尺寸的允许偏差

构成钢绞线的锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线的直径应符合表 3.1-44 中的标称直径，在此范围内其偏差规定为：对直径 2.642mm 和 3.048mm 的线为±0.102mm；对直径 3.683mm 和 4.191mm 的线为±0.127mm。

表 3.1-44 镀层的最小质量

镀层线的标称直径（mm）	未镀线表面的最小质量（g/m^2）		
	A 级	B 级	C 级
2.64	245	490	730
3.05	260	520	780
3.68	275	550	825
4.19	275	550	825

4.6.6 表面状态

锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢线应直径均匀、没有金属薄片、气化皮、不均匀、裂缝和其他与良好的商业实践不相一致的缺陷。镀层应连接和合适地均匀。

4.6.7 钢绞线技术性能

（1）镀层质量。镀层质量见表 3.1-44；镀层的质量试验按 ASTMA90 试验方法进行。

（2）拉断力和质量。成品钢绞线的最小拉断力见表 3.1-45 要求。绞线的大致质量见表 3.1-45（仅供参考）；由于试验机钳口试件的滑移，或在钳口内破断，或试件不适的夹头制作所引起的成品钢绞线的最小拉断力低于表 3.1-45 中的规定时，这个试件应作废，并应另取来自同圈或同盘的试件进行试验。

（3）伸长率。按 ASTM A90 试验方法标准测定的绞线（试件长 610mm）的伸长率应不小于 5%[对高强度和 7.94mm 3 股线绞制的多种用途（通用）级]和 4%[对超高强度和 9.52mm 平共处 7 股线绞制的多种用途（通用）级]；被测定的伸长率应是试验机两个钳口间分离增量的百分数，两个钳口间的起始位置是在施加初负荷以后，而在试件开始破断时的位置即为终点的位置。当初始负荷等于所要求的钢绞线最小拉断力的 10%时，试验机钳口的分离间距应约为 0.61m。伸长率值仅在试件断口离试验机钳口超过 25.4mm 时，才认为是有效的，可以记录下来。

（4）钢线的韧性。整个钢绞线的各根股线，当在不超过 15 圈/分的速度下，沿着芯棒直径等于 3 倍在试股线标称直径紧密螺旋缠绕至少 2 圈时应没有断裂。

（5）镀层的附着力。在钢线做韧性试验时，可同时做镀层的附着力试验，试验方法和条件与钢线韧性试验相同。在韧性试验后，锌—5%铝—混合稀土合金镀层应附着在线上没有起层，其程度以用手指擦不掉为准。在附着力试验中由于镀层线表面的机械摩擦形成的镀层小颗粒疏松或脱落不能作为拒收的理由。

4.6.8 钢绞线的尺寸

成品钢绞线的尺寸应按钢绞线的标称直径表示，见表 3.1-45。

表 3.1-45 架空地线用锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢绞线的物理性能

钢绞线标称直径（mm）	钢绞线中股线的根数（根）	绞线中镀层线的标称直径（mm）	钢绞线每米大致质量（kg/m）	钢绞线最小拉断力（kN）		
				高强度级	超高强度级	多种用途（通用）级
7.94	3	3.68	0.255	—	—	28.9
7.94	7	2.64	0.305	35.6	49.8	—
9.52	7	3.05	0.407	48.0	68.4	51.2
11.11	7	3.68	0.595	64.5	92.5	—
12.7	7	4.19	0.770	83.6	119.6	—

❶ 摘自 ASTM A925—98《架空地线用锌—5%铝—混合稀土合金镀层钢绞线》。

5　导体的腐蚀与保护

导体在生产过程中和使用中会产生腐蚀。由于铜和铜合金，铝和铝合金，就材料本身耐蚀性相对而言是比较好的，但在特殊的生产和使用条件下，也要采取必要的保护措施。例如：在橡皮绝缘线缆中的铜线发黏发黑、双水内冷发电机用铜空心导线的腐蚀（因与循环水相接触，因而也要采取相应的缓蚀措施）；铝塑复合护层通信电缆的挡潮层，由于屏蔽层的铜编织线与铝、塑复合护层中的铝相接触产生的电化腐蚀，从而可用铝镁合金编织线，取代铜编织线而获得很好的耐蚀效果；铜线经拉线，特别在退火后在车间里放置不长时间就产生发黑；成盘的成品架空导线在露天或简陋的仓库中放置，特别在潮湿闷热，下雨的天气，在导线表面和层间产生的氧化发黑；由钢、铝股线绞合的架空导线，在使用中产生的电化腐蚀等。在产品设计、生产和使用时，在必要的情况下，均需考虑相应的保护措施。

5.1　在橡皮绝缘线缆中铜线的发黑发黏和防护

在 20 世纪 80 年代，为解决铜线芯变色、发黑与橡皮黏连的方法，一般是采用加有防老剂 DNP、防老剂 MB 而无硬酯酸的无硫橡皮配方。然而，长期的实践表明，这种配方虽能使束绞线铜线芯的外表面（接触橡皮的部分）保持原有色泽，但将束绞线芯松开后，单根铜线表面（不接触橡皮的部分）仍有不同程度的变色。为此，采取了以下解决办法：在束线之前，先将单根铜线用铜抑制剂（或称铜缓蚀剂，或称铜钝化剂）浸渍后，使其表面在 90～100℃温度下形成一层稳定的保护膜。所用主要的铜抑制剂是苯骈三氮唑（BTA）和 2－巯基苯骈咪唑（防老剂 MB）。其中，BTA 可与铜形成极稳定的螯合物；2－巯基苯骈咪唑可与铜生成非常稳定的化合物。上述两种成分的协同效果很好，在铜线表面生成的薄膜厚度约为 10^{-10} m，可有效地保护铜不受硫、氧或其他有害物质的侵蚀。

迄今为止，已经达成共识：欲彻底解决橡套软铜线变色发黑问题，只有取消含硫的硫化体系，采用过氧化物硫化体系。简单地把过氧化物硫化体系应用在天然胶/丁苯胶（NR/SBR）绝缘橡皮中。虽然可以完全解决铜线变色发黑问题，但由于绝缘橡皮在加工、储存、使用中，过氧化物将导致 NR/SBR 绝缘发生降解反应，橡皮机械性能快速下降，直至发黏、龟裂、脆化。从目前来看，采用三元乙丙胶/氯化聚乙烯（EPDM/CPE）代替 NR/SBR 作为绝缘橡皮，并用过氧化物 DCP 硫化体系硫化，既解决了橡套软线在使用过程中铜线变色发黑现象，又杜绝了绝缘橡皮发黏、龟裂、脆化等质量问题。EPDM/CPE 比 NR/SBR 绝缘材料成本约提高了 15%，但只占整根电缆成本的 1%～2%。

5.2　铜线在空气中发黑和保护

铜线经拉线、退火后放在车间里时间不长就出现发黑的现象，致使成品改制或报废。这种现象特别在潮湿闷热天气和空气中存在 CO_2、SO_2、NH_3 和 H_2S 等污染气体的车间里更易发生。铜线发黑究其原因，可以由环境因素引起，也可以由工艺因素和环境因素共同作用引起。所谓工艺因素，例如拉线乳化液变质，或用一般自来水配制乳化液，乳化液质量指标控失，在拉线后立即连续退火，放在车间里会出现大量黑点。抑制铜线发黑的方法，目前一般可在拉线乳化液、密封水中（如水封式退火炉）或在单独工序上进行钝化处理。

铜和铜合金的缓蚀剂（钝化剂）品种较多，如：巯基苯骈噻唑（MBT）、苯骈三氮唑（BTA）、1－羟基苯骈三氮唑等，而且缓蚀剂（BTA）如果与氧化促进剂、辅助成膜剂配用，可起到更好的效果。传统采用的六价铬工艺，因六价铬污染严重，已被国家明令淘汰。现在使用比较多的钝化剂为苯骈三氮唑，其分子式为 $C_6H_5N_3$。苯骈三氮唑（BTA）具有来源广、价格低的特点，因此其作为钝化工艺的基础成分。BTA 是铜、银等金属的特效缓蚀剂，其缓蚀机理是：在 pH＝6.5～9.0 的水溶液中，苯骈三氮唑吸附到金属表面（与 Cu^+ 在铜表面形成不溶性保护膜）后，分子中 N—H 化学键上的氢原子被铜原子取代形成 Cu—N 共价键，同时 BTA 分子中另外两个氮原子的孤对电子对也与铜原子形成配位键。这样，由铜和 BTA 分子交替形成一种较为复杂、厚度约为 5nm 的配合物被膜结构。该膜层在 200℃以上的高温仍能保持良好的缓蚀效果，起到隔绝外界侵入性物质的作用。与 BTA 配用的氧化促进剂可选用亚硝酸钠和间硝基苯磺酸钠。这两种物质在中性和弱碱性介质中能比较稳定，同时具有较弱的氧化性，效果较好；辅助成膜剂（含有亚氨基、羟基等官能团的有机物，如尿素、聚醚类有机高分子化合物等也能与铜金属形成配合物被膜。因此，引入作为辅助成膜剂，被膜与 BTA 被膜混合，形成更为致密的膜层，提高了防护效果。促进剂与辅助成膜剂的引入提高了钝化防护效果，克服了单一苯骈三氮唑成膜所需的温度高、反应时间长的缺点，使钝化温度可降至室温，钝化时间减少。将氧化促进剂（亚硝酸钠约 20g/L，间硝基苯磺酸钠约 5g/L 和辅助成膜剂（尿素约 100g/L，多亚氨基羟聚醚适量）配制成钝化剂，与苯骈三氮唑配用，工艺条件为 pH 值：7.0～9.0，温度：常温（0℃以上），浸泡时间 0.5～10min。溶剂配制时，先加入 75%的自来水，再加入已用温水溶解的 BTA，搅拌均匀，最后加入钝化剂，调整 pH 值，补充液位即可使用。

5.3　钢芯铝绞线在空气中局部发黑及其试验

在南方雨季高温高湿环境条件下生产的钢芯铝绞线经库存一段时间后，现场施工使用时曾多次出现钢芯铝绞线表面带有不均匀性黑膜现象，由于生产与施工之间时间间隔较短，行业界对此有“不影响使用性能，仅影响商业外观”的认同。但是近些年来对一些高温高湿现象不十分明显的北方地区，特别是处于工业集中区的生产企业，由于工业大气环境和弱高温高湿双重作用，每年 7～9 月的雨季所生产的钢芯铝绞线也出现类似情况。因此，对其腐蚀行为以及微观形貌等性质进行对比试验，以便为可否继续使用提供科学依据。为此，山东大学化学与化工学院，进行了表面不均匀发黑钢芯铝绞线耐蚀性能对比及可用性研究，具有一定的实际意义。

根据钢芯铝绞线的使用范围和特点，腐蚀性能对比分别采用模拟海洋气氛的全浸加速腐蚀试验、盐水喷雾腐蚀试验和模拟工业环境气氛的二氧化硫加速腐蚀试验。

5.3.1　5%盐水全浸腐蚀试验

试验条件：5%NaCl 溶液，温度（35±0.5）℃，pH＝6.8±0.5，全浸不搅拌，连续 196h。此腐蚀试验可视为无氧条件的结果。类比于海洋环境的腐蚀行为，试验结果如表 3.1-46 所示。

表 3.1-46 5%盐水全浸腐蚀试验结果

样 品	增质量 [g/(m² · h)]	平均增质量 [g/(m² · h)]
试样 A(表面有不均匀性黑膜的钢芯铝绞线的外层铝线)	0.006 8	0.0074
	0.007 6	
	0.007 9	
试样 B[表面有不均匀性黑膜的钢芯铝绞线的内层(无黑膜)铝线]	0.007 4	0.007 1
	0.006 9	
	0.007 0	
试样 C(另外厂家生产的表面正常的钢芯铝绞线的铝线)	0.007 4	0.007 0
	0.007 0	
	0.006 6	
试样 D(其他另一个厂家生产的表面正常的钢芯铝绞线的铝线)	0.007 8	0.007 6
	0.007 6	
	0.007 4	

从表 3.1-46 数据看，表面不均匀性黑膜铝单线与其他正常铝单线相比，5%盐水全浸试验腐蚀速率无明显差别。另外，在试验过程中可见，60h 后，表面不均匀性黑膜铝单线与其他正常铝单线的表面颜色以及腐蚀产物的外观形态趋于一致。

为进一步说明问题，对试样 A 和试样 B 又进行了相同试验条件的 60h 腐蚀对比试验，结果如表 3.1-47 所示。

从表 3.1-47 可见，在腐蚀试验的前阶段，内层正常铝单线的腐蚀速率稍高于外层表面不均匀性黑膜铝单线，说明表面不均匀性黑膜铝单线已提前氧化，在腐蚀一开始就进入"膜保护"的缓慢氧化阶段，而内层正常铝单线开始时是纯铝表面的直接氧化阶段，所以其腐蚀速率要稍高于表面不均匀性黑膜铝单线，约 60h 后，两者的表面颜色以及腐蚀产物的外观形态逐渐趋于一致。

表 3.1-47 表面不均匀性黑膜钢芯铝绞线的内外层铝单线腐蚀对比

样 品	增质量[g/(m² · h)]	平均增质量[g/(m² · h)]
试样 A	0.008 2	0.008 3
	0.008 5	
	0.007 9	
试样 B	0.009 6	0.009 9
	0.010 2	
	0.010 0	

5.3.2 盐水喷雾试验

试验条件：NaCl 溶液[浓度(50±5)g/L]，温度(35±2)℃，pH=3.1～3.3，采用间歇操作，间隔时间为 8h，试验时间为 96h，试验结果如表 3.1-48 所示。

由表 3.1-48 可见，在盐水喷雾试验条件下，表面不均匀性黑膜铝单线的腐蚀速率与表面正常铝单线也基本相同。

表 3.1-48 盐水喷雾试验结果

样 品	增质量[g/(m² · h)]	平均增质量[g/(m² · h)]
试样 A	0.013 6	0.013 5
	0.013 7	
	0.013 2	
试样 B	0.013 6	0.013 7
	0.013 8	
	0.013 7	
试样 C	0.014 2	0.013 9
	0.013 7	
	0.014 8	
试样 D	0.013 4	0.013 6
	0.013 8	
	0.013 6	

5.3.3 二氧化硫气体腐蚀试验

试验条件：HF—45A 化工气体腐蚀实验箱，二氧化硫浓度 0.8%(体积百分比)，温度 25℃±2℃，连续试验 240h。

从表 3.1-49 可以看出，在二氧化硫气体中腐蚀 240h，表面不均匀性黑膜铝单线与表面正常铝单线的腐蚀速率无明显差别。另外，试验过程中可以发现，试验进行 72h 后，表面不均匀性黑膜铝单线与其他正常铝单线表面颜色，腐蚀产物外观形态趋于一致。

表 3.1-49 二氧化硫气体腐蚀试验结果

样 品	增质量[g/(m² · h)]	平均增质量[g/(m² · h)]
试样 A	10.69	10.69
	10.73	
	10.66	
试样 C	10.41	10.42
	10.37	
	10.47	
试样 D	10.64	10.66
	10.68	
	10.71	

5.3.4 微观形貌对比

为了分析表面不均匀性黑膜铝单线与正常铝单线的微观形貌差别，采用扫描电镜对试样 A、B 两种样品表面的微观形貌进行了观察。试样 A、B 两种样品表面的微观形貌如图 3.1-1 和图 3.1-2 所示。

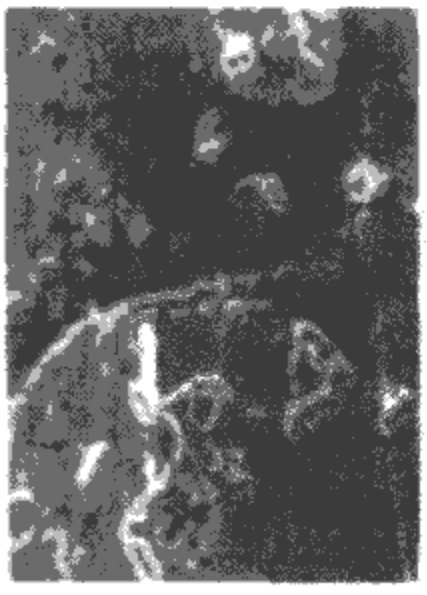


图 3.1-1 试样 A 表面不均匀性黑膜区域扫描电镜微观形貌

从微观形貌上看，表面带有不均匀性黑膜的试样 A 有提前氧化的氧化膜存在，斑点较大；表面正常的试样 B 也有提前氧化的氧化膜存在，但斑点较小，两者在微观形貌上略有

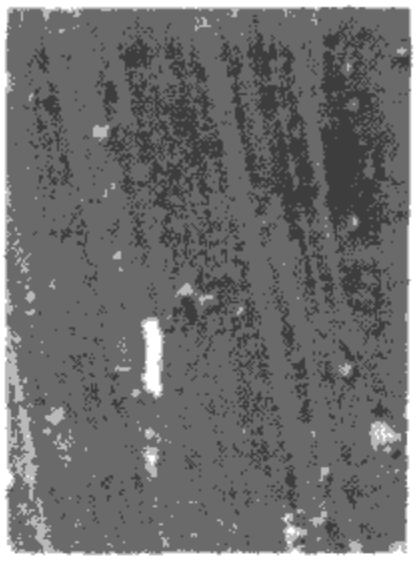


图 3.1-2　试样 B 正常表面
扫描电镜微观形貌

差别，但无本质差别，所形成的氧化膜形貌及构成也大体相当。

5.3.5　钢芯腐蚀电化学性能测试

钢芯铝绞线中的钢线是产品使用时的承重载体，其抗拉强度直接决定了钢芯铝绞线总截面的抗拉强度，经测试，表面带有不均匀性黑膜的钢芯铝绞线的钢线与正常钢芯铝绞线的钢线在抗拉强度上无明显差别。

但是还应考察其钢线热镀锌层是否有变化。就表面带有不均匀性黑膜的钢芯铝绞线的钢线与正常钢芯铝绞线的钢线进行了腐蚀电化学测试，以观察其腐蚀电化学极化曲线是否异常。

试验条件：铂金电极为辅助电极，饱和甘汞电极为参比电极，热镀锌钢线按电化学测试要求封闭处理后为研究电极。在 HDV—7 晶体管恒电位仪上测定，用 123—200 函数记录仪记录数据，恒电流法测阴、阳极极化曲线。每相隔 5s 调节一次极化电流(mA)，分别为±0.5、±1、±2、±3、±4、±6、±8、±10、±20、±30、±40、±60、±80，记录对应电位值(mV)。极化曲线如图 3.1-3 和图 3.1-4 所示。

从图 3.1-3 和图 3.1-4 中的腐蚀电化学极化曲线可以看出，表面带有不均匀性黑膜的钢芯铝绞线的钢线与正常的钢芯铝绞线的钢线比较，其钢线的阳极和阴极极化曲线基本一致，说明其腐蚀行为和腐蚀速度没有差别。

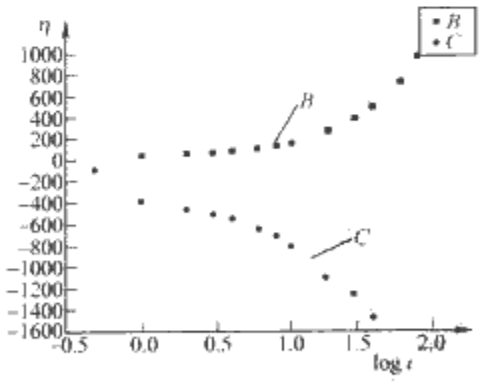


图 3.1-3　表面不均匀性黑膜
钢芯铝绞线钢线阴、阳极极化曲线
B—阳极极化曲线；*C*—阴极极化曲线

5.3.6　电气性能测试

按照国家标准，对两种样品进行相关电气性能测试。20℃时，表面带有不均匀性黑膜的钢芯铝绞线的铝线，其电阻率为 0.027 95Ω · mm²/m，正常钢芯铝绞线的铝线，其电阻率为 0.027 93Ω · mm²/m，均符合 GB 1179—1999

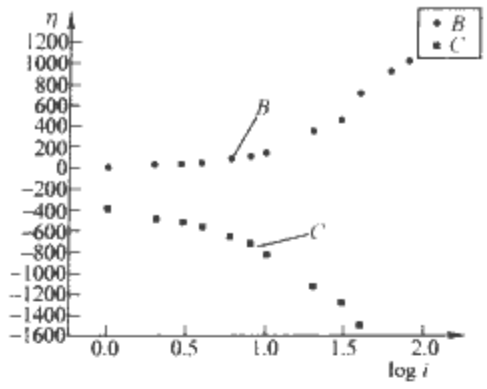


图 3.1-4　正常钢芯铝绞线钢线
阴、阳极极化曲线
B—阳极极化曲线；*C*—阴极极化曲线

《铝绞线及钢芯铝绞线》所规定的电阻率≤0.028 264Ω · mm²/m。因而钢芯铝绞线表面不均匀性黑膜现象对电气性能不产生影响。

5.3.7　结论

高温高湿单一条件下生产的表面不均匀性黑膜钢芯铝绞线，只要库存与施工使用时间间隔不长，则为“不影响使用，仅影响商业外观”的产品。其主要依据为：铝的抗大气腐蚀是依靠其表面氧化膜，其腐蚀机理为腐蚀学界所称的“膜保护”，即依靠在大气环境中形成的致密氧化膜能相对有效地防止腐蚀介质的继续侵入，使腐蚀由纯铝表面的直接氧化阶段进入“膜保护”的缓慢氧化阶段。在高温高湿条件下，钢芯铝绞线多数是由于包装不严使雨水等介质沿缝隙侵入，或包装过严使铝杆在拉制铝线过程中存留的油脂和潮气以及内部湿热气体等，在存放过程中不能有效排出而聚集，造成提前氧化，由于侵入区域或聚集区域的不均匀性，造成无规律表面不均匀性黑膜现象，但在大气环境条件下架线通电一段时间后，最后结果为表面外观一致。

北方工业生产集中区内弱高温高湿的雨季所生产的表面不均匀性黑膜钢芯铝绞线是受弱高温高湿和工业气氛微腐蚀环境双重作用的结果。从模拟三种大气环境加速腐蚀试验结果、微观形貌观察以及腐蚀电化学等性能测试结果对比可以看出，表面带有不均匀性黑膜的钢芯铝绞线与正常的钢芯铝绞线其腐蚀行为、腐蚀速度和微观形貌大体一致，均具有铝的氧化过程特征。

因此，北方工业生产集中区弱高温高湿的雨季所生产的钢芯铝绞线，由于受到弱高温高湿和工业大气环境双重作用，其外层表面与南方高温高湿单一因素作用下的钢芯铝绞线具有相当的腐蚀类似性，在库存与施工时间间隔相对较短的前提下，两者均为“不影响使用，仅影响商业外观”的产品。

5.4　钢芯铝或钢、铝混绞线在大气中的腐蚀和保护

钢芯铝绞线或钢、铝混绞线等架空导线在架空线路上长期使用时，由于两种不同金属的接触，存在电化腐蚀，也由于线路架设区的环境和气象条件不同，所以架空导线在线路上到底能用几年是无法一概而论的。钢芯铝绞线在清洁地区的使用寿命一般为 20～30 年，沿海地区为 5～20 年，盐田区为 5～15 年，化工及工业地区为 5～10 年，临海重工业地区在 3 年以上。因此，一般在沿海地区(有盐雾的气象条件)、工业区，特别是化工区(有 SO_2、N_2O、CO_2、Cl_2、酸性气体等污染的气象条件)和沿海—工业区架空线路用的上述导线，必要时需要采取防腐保护措施。采用防腐油(涂油)保护是全世界比较常用的方法。

5.4.1 腐蚀的机理

盐雾对钢芯铝绞线的腐蚀现象和其他腐蚀现象一样，都是电化学引起的金属离子反应。腐蚀电位不同的两种金属组合在一起（锌：－1.07V；铝：－0.78V；铁：－0.45～0.65V），电位低的金属形成阳极，电位高的金属形成阴极，不同金属接触腐蚀开始产生，电位低的金属被腐蚀。在导线中由于铝或铝合金股线与镀锌钢股线相接触，锌层首先开始腐蚀，当镀锌层被腐蚀掉露出钢线以后，铝和钢线之间发生了异种金属接触腐蚀，腐蚀电位低的铝开始被腐蚀。

5.4.2 对架空导线防腐油的要求和试验

GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》标准中规定了使用涂有防腐油的导线，防腐导线分轻防腐（钢芯涂防腐油）、中防腐（钢芯和层间铝股线都涂防腐油）和重防腐（导线外层也涂防腐油，但不在导线制造厂涂，而是在导线架空的现场进行）。虽然防腐导线早已使用。但目前我国和IEC标准还没有防腐油原材料标准，而英国—欧洲电工标准（BSEN 50326：2002）已经实施（见后）。因此，对防腐油材质（种类）的要求、技术指标、检验和验收方法可供供、需双方作为参考。

国际电工委员会（IEC）曾制定过《架空铝、铝合金和钢绞线用防腐油的特性》标准，但在1997年IEC/TC7印度新德里会议上该IEC 61394草案被否决了，原因是该草案缺乏防腐性能的考核指标，故供、需双方之间难于验收，标准缺乏可操作性，但该草案作为技术资料，尚有参考的价值，因此已以IEC 61394第Ⅱ型式技术报告出版。

适用于架空绞线——铝和铝合金、镀锌和锌铝（稀土）合金的钢线以及铝包钢线用的防腐油应符合下列要求：

（1）防腐油或其任一组元不应由于储存、运输、安装、搬运、最高使用温度或正常的短路而损坏或从导线上流出或挤出。

（2）防腐油不应在导线的制造过程中损坏，对防腐油应进行稳定性、老化性和油分离性试验。

（3）防腐油应在整个很可能出现的使用温度范围内保持它的性能。

（4）防腐油对线应有良好的黏附性能。

（5）防腐油应对导线具有防腐作用，既不应使股线腐蚀，亦不应影响镀锌钢线、铝包钢线、铝或铝合金或任一构成股线的性能，对防腐油应进行腐蚀试验。

（6）防腐油不应增加电晕噪声。

（7）防腐油不应对健康构成危害，并应符合健康和安全的标准。

目前国际上已使用的防腐油基本上可概括为两类，导线制造厂可择一而用之。

第Ⅰ类防腐油，通常在冷状态下涂制，例如滑脂（Grease）——有半固体的或固体的防腐油。这类防腐油主要是由矿物油或合成油和金属皂或无机化合物（复合物）稠化剂经稳定化混合后制成的。如果防腐油是触变性（Thixotropic）的和或准一塑性（Pseudo-plastic）的，那么防腐油制造厂应建议，在这种情况下对防腐油适用的试验型式应由防腐油供方、导线制造厂和导线用户三方同意。

第Ⅱ类防腐油，通常在热状态下涂制，例如矿脂（Petrolatum）——有半固体的或固体的防腐油。这类防腐油主要是由微晶石蜡与少量矿物油和有机添加剂制成的。

对防腐油应进行常规质量检验和认可质量检验。常规质量检验包括：滴点检验，试验方法按ISO 2176；可渗透性检验，试验方法按ISO 2137；酸性和碱性指数检验。认可质量检验包括：

（1）黏附性试验——涂在1.00mm铝板上的0.5mm厚的油膜，在－20℃保持1h，在直径25mm的芯棒上弯曲120°，油膜应保持黏在板上，且不裂或分层剥落。

（2）稳定性和老化试验——在锌层厚度3.75～2.8μm的电镀锌钢板（100mm×100mm×2mm）上涂以防腐油，进行老化和盐雾试验。

（3）腐蚀试验——在经受稳定性和老化试验后的金属板上先后进行SO_2（7个周期，共168h）和5%盐雾试验（按IEC 60068－2－11，暴露168h，35℃±1℃），然后用溶剂除去油后按规定评估板的腐蚀程度。

（4）油分离检验——在规定的试验条件下测定从防腐油中析出的油量，以预示防腐油储存在桶中的行为信息。

经三方协商同意，供试的油样可从供油方、用油方和成品导线上取得。

5.4.3 架空导线防腐油研发的进展

我国架空导线的防腐油，基本上属于国际通用的第Ⅰ类防腐油，其配方的基本组成与上海电缆研究所于20世纪60年代初开发的防腐油基本上是同出一工。这种防腐油于1964年第一次在杭州电缆厂生产防腐导线，并当年运抵非洲，在赞—坦铁路沿线使用，然后，也在国内推广应用，直至今日，都取得了较好的防腐效果，但必须指出的是这种配方毕竟年代已久，需要创新开发。

国内防腐油的大致配方和性能见表3.1-50和表3.1-51。这种防腐剂的涂制工艺都在绞线机上在线涂制。根据配方及其性能的不同，涂制防腐油可适当加热或在常温下进行。在导线上涂制的方式，可以在导线的层间涂，也可在每根股线上涂。根据涂制方式的不同，所用涂制的工模具可用专用的防腐油挤出机（和一般的挤塑机相同）以及特制的定径木模，也可使用涂油匣（加热或不加热）和定径木模。

表3.1-50 国内防腐油配方基本组成

配方基本组成	含 量(%)
光亮油	53～60
天然胶	3.0
地腊	1.5～3.0
防老剂D	1.0
聚异丁烯B30(或聚异丁烯B10)	8.0(16.0)
氧化锌	7.0
石棉泥	6.0
云母粉	7.0
乙炔炭黑	5.0～5.5

表3.1-51 国内防腐油配方性能

项 目	性 能	试验方法
滴点(℃)，不小于	250	SYB 2702—59
黏附性	好	BS 1858
滴流试验(110～150℃，两周)	不滴流	—
弯曲试验(－50℃)	不裂	—
水溶性试验(溶物重%)	0.05	—
耐盐雾试验	耐	ASTM B 117—57T
150℃老化试验(两周后弯曲)	不裂	—
吸湿性	<1.0	ГОСТ 40078

英国开发的Cablegard（Vapor-Tek防腐剂GB 2131822B专利）是一种容易涂制的防腐剂，它是在高度精制、凝胶的矿物油中由防腐剂、渗透剂、金属钝化剂和防老剂的复合混合物组成。其一，它能保护所有主要的金属和合金，且对钢、铝和锌特别有效。其二，在涂制工艺上有特点，Cablegard在室温下制造导线时涂上去的，它在室温下泵出和涂制的是流体，但当被涂到导线上以后它立即再凝胶和硬化形成像润滑脂那样的稠度，可牢固地保持在被涂的地方。与热涂防腐油不同，Cablegard具有独特的黏度和流动特性。它的独特凝胶（或说稠化）方式使得产品具有优秀的高温性能（在200℃下防腐剂不流出或沿导线流动）。其三，Cablegard具有特殊的流变（特性），这是由于使用了凝胶和稠化剂的独特结合。假塑性体和触变（性）两者结合以及凝胶（体）的网状组织满足了允许胶体稳定性可控度的要求。其四，当使用含有少量溶剂的改良型Cablegard时，并采用“飞行筒”和无线电控制，可在架空线路的现场对局部腐蚀的导线进行防腐处理，此时，涂到导线外层股线上的防腐油可渗透到导线的里面，且能置换股线表面的盐溶液，从而可大大延长导线的使用寿命。

日本藤仓电线株式会社开发的“特殊防腐剂”是在调整防腐油组分的基础上开发出的一种高性能防腐油。该种防腐油不仅在酸性气氛中有良好的防腐效果，而且也改进了对盐雾的防腐效果，其特性如表3.1-52所示。有关盐水喷雾、耐水和氯化氢腐蚀的对比试验如表3.1-53和图3.1-5所示。

表3.1-52 特殊防腐剂的特性

项 目	条 件	单 位	特 性 值
化学性质	—	—	中性
耐热性	—	℃	280℃以上
耐塞性	−30℃，1h	—	无龟裂、剥离
密度	20℃	g/cm^3	约0.9

表3.1-53 有关盐水喷雾、耐水和氯化氢腐蚀对比试验结果

项 目	试 验 条 件	试 验 结 果		
		不涂防腐剂	涂通常防腐剂	涂特殊防腐剂
盐水喷雾试验	按JISZ 2371标准：5% NaCl中性盐水；试验5000h	内部堆积有白色腐蚀生成物，内层铝线因腐蚀而变细，最大腐蚀孔深度250μm	最大腐蚀孔深度170μm；没有看到堆积的腐蚀生成物	没有生成腐蚀孔；没有看到堆积的腐蚀生成物
耐水试验	人工降雨强度150mm/h；喷水30天	—	良	防腐剂残存率99.8%，优良
氯化氢气体腐蚀试验	在干燥器下部装满盐酸，试样水平放置于干燥器上部，然后放入恒温箱，试验温度在15～40℃循环，时间3800h	最大腐蚀孔深度（见图3.1-5）为950μm；外层有厉害的腐蚀发生	最大腐蚀孔深度（见图3.1-5）为680μm；外层有厉害的腐蚀发生	最大腐蚀孔深度（见图3.1-5）为350μm；几乎看不到腐蚀

注 试样160mm^2钢芯铝绞线，不涂防腐剂，涂通常防腐剂和涂特殊防腐剂。

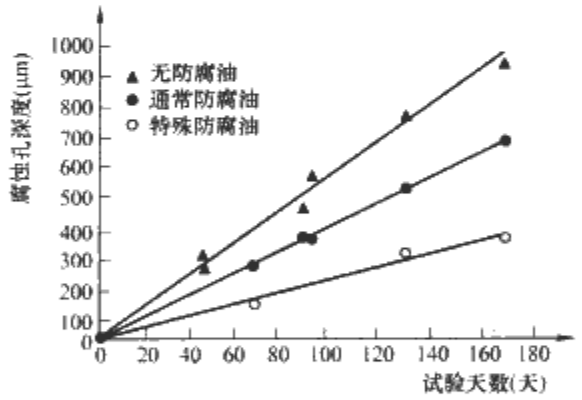


图3.1-5 氯化氢气体腐蚀试验后试样腐蚀孔深度

5.5 架空导线用防腐油特性❶

5.5.1 适用范围

该防腐油用于铝、铝合金、钢线或这些单线结合在一起的架空导线。

5.5.2 对防腐油的规定

（1）防腐油用Q_1AQ_2或Q_1BQ_2表示。此处，A和B指的是防腐油的型号。

A型——涂防腐油不需加热。例如这种防腐油主要由矿物油或合成油与增稠剂（如金属皂或无机化合物）的稳定混合物所组成。

B型——涂防腐油需加热，例如这种防腐油由矿脂(Petrolatum)、含有少量矿物油和有机添加剂的蜡所组成。

Q_1——用℃表示，在0℃以下的最低温度，在此温度下，在英国—欧洲电工标准BS EN 50326：2002《架空导线用防腐油特性》中涉及的试验都要求执行。

Q_2——用℃表示的最高温度，在此温度下，在英国—欧洲电工标准BS EN 50326：2002《架空导线用防腐油特性》中涉及的试验都要求执行。

如果导线的使用者需要，Q_1和Q_2应由防腐油顾客规定。例如，20A150：A型防腐油，Q_1温度为−20℃和Q_2温度为150℃；20B110：B型防腐油，Q_1温度为−20℃和Q_2温度为110℃。

（2）防腐油供应者给予防腐油独特的名称或代码，并应保留防腐油组成的详细资料，以便验证。防腐油的组成应包括：制造的允许波动，并当该种名称或代码的防腐油销售时保持不变，除非已和导线使用者达成了某种协议。

5.5.3 防腐油的要求

防腐油应符合下列要求：

（1）防腐油应保护架空线路用的导线在工作和储存期间不受大气腐蚀。该试验要求应符合D—Ⅻ条。

（2）防腐油应在规定的操作条件下涂在导线上，并应符合为导线工作寿命所规定的要求。在D—Ⅴ、D—Ⅵ、D—Ⅶ、D—Ⅷ、D—Ⅹ和D—Ⅺ条中的试验要求应证明符合，此外，在D—ⅩⅢ条中规定的试验，可以由防腐油购买者规定。

（3）为了证明防腐油可满意地涂到导线上具有优良的附着力，在D—Ⅶ和D—Ⅸ中的试验要求应符合。

❶ 摘自英国—欧洲电工标准BS EN 50326：2002《架空导线用防腐油特性》。

5.5.4 试验

(1) 总则。在温度超过由防腐油供应者指明的最高安全操作温度下，不执行任何试验项目。

在本标准中所有强制性的试验应由防腐油供应者执行；在 EN 50182（架空线路用导线—圆单线同心绞导线）中规定的防腐油试验应由导线制造者执行。

(2) 试验分类。

1) 型式试验。其目的企图证明取决于组成的防腐油的主要特性。这些试验对供应者规定的名称或代码的一种防腐油只做一次而已，但如果防腐油的组成已被改变，从而使得在表 3.1-54 中指明的任一试验特性可能有改变，那么应重做。

2) 样品试验。其目的企图保证防腐油的质量，从而使之符合本标准的要求。

3) 型式试验和样品试验如表 3.1-54 所示。

表 3.1-54 防腐油的型式试验和样品试验

项目	试验		型式试验		样品试验	
	特性	条款	A 型	B 型	A 型	B 型
1	滴点	D—Ⅴ	—	×	—	×
2	高温稳定性	D—Ⅵ	×	—	×	—
3	渗透性（A 型）	D—Ⅶ	×	—	×	—
4	渗透性（B 型）	D—Ⅷ	—	×	—	×
5	附着力	D—Ⅸ	×	×	—	—
6	酸性/碱性指数	D—Ⅹ	—	×	—	—
7	老化	D—Ⅺ	×	×	—	—
8	腐蚀	D—Ⅻ	×	×	—	—
9	在稳定状态条件下的稳定性	D—Ⅹ Ⅲ—a)	a	a	—	—
10	在短路条件下的稳定性	D—Ⅹ Ⅲ—b)	a	a	—	—

a 当导线的使用者要求试验时，防腐油的买方和供方之间应有协议。

(3) 试样的前提（先决条件）。

1) 按固体形式交付的 B 型防腐油应被预先处理，其目的是为了在 D—Ⅴ、D—Ⅷ、D—Ⅸ 和 D—Ⅹ 的试验以前均匀这防腐油，除非在下列条款中另有规定。

a. 防腐油应在熔化发生的温度之上的 10℃和 20℃之间加热，并保持这个温度 0.5h。

b. 为试验所需的数量，呈液体状态倒入容器，并使其冷却，最小历时 24h。

2) 在交货时，如在 A 型防腐油的表面上有过剩的油应构成拒收的原因。

(4) 温度的精度。在本标准中涉及的所有试验中，温度应被测定，测温工具的精度至少为 1℃。

(5) B 型防腐油的滴点试验。用 ISO 2176 规定的方法，滴点测定 5 次。5 次测定 Q_m 的最小值应大于或等于 Q_2。

(6) A 型防腐油的高温稳定性试验。本要求应由下列两个试验证明：

1) 油析出（分离）应被测定，按 IP121 规定的方法进行测定，在 Q_2 的温度上 1h 后，析出油的最大数量应为 0.2%（重量）。

2) 滴点试验应在 5 个样品上执行，按 ISO 2176 规定的方法测定。A 型防腐油可能没有一个明确的滴点。在（Q_2 +20℃）下试验可以停止（中止），除非防腐油的买方需要短路温度能力（性能）的数据，在此情况下，滴点试验应被延续到要求的温度。

(7) A 型防腐油的渗透性试验。

1) 对 A 型防腐油应执行渗透性试验：以证明防腐油的交货是与型式试验样品相一致的；以确认这种防腐油是具有满意的泵出能力的；以证明这种防腐油的性能在说明储存和工作状况的老化后（见 D—Ⅺ）没有明显的变化。

2) 防腐油的一个试样应被试验，用一个全刻度（尺度）锥体（Using a Full Scale Cone），在 25℃温度下，按 ISO 2137 规定的方法进行试验。

3) 验收标准如表 3.1-55 所示。

表 3.1-55 A 型防腐油渗透性试验验收标准

试验	验收标准
型式试验	平均值≥70 $\frac{1}{10}$mm，除非防腐油买方和供方另有协议
样品试验	平均值不应与该型式试验的平均值相差大于该型式试验平均值的 20%

(8) B 型防腐油的渗透性试验。

1) 在 D—Ⅷ条中规定的渗透试验应对 B 型防腐油执行试验：以证明防腐油的交货是与型式试验样品相一致的；与酸性/碱性试验（见 D—Ⅹ 条）一起，以证明防腐油的性能在说明储存和工作状况的老化后（见 D—Ⅺ）没有明显的变化。

2) 防腐油的一个试样应被试验，用一个全刻度（尺度）锥体，在 25℃温度下，按 ISO 2137 规定的方法进行试验。

3) 验收标准如表 3.1-56 所示。

表 3.1-56 B 型防腐油渗透性试验验收标准

试验	验收标准
型式试验	120～180 $\frac{1}{10}$mm
样品试验	平均值不应与该型式试验的平均值相差大于该型式试验平均值的 20%

(9) 低温附着力。

1) 测定用的铝板尺寸约为(100±5)mm×(100±5)mm×(1.0±0.1)mm，在铝板的一侧涂上一层厚(0.5±0.05)mm 的防腐油，与一根直径为 25mm 的芯棒一起，被冷却到不大于 Q_1 的温度，并保持 1h。

2) 这板应放在芯棒上，涂油的表面向上，并在 5s 内稳定地在不涂防腐油的表面上弯成内角为 100°和 120°之间的形状。

3) 验收标准应防腐油仍保持附着在板上，没有任何裂开或分离，判别用正常或校正视力的肉眼进行，但不需放大。

(10) B 型防腐油酸性和碱性指数试验。

1) 酸性或碱性试验应执行，与渗透试验（见 D—Ⅷ条）一起，以证明防腐油的性能在老化以后（见 D—Ⅺ条）没有明显的变化。

2) 该试验方法应按附录 A（B 型防腐油酸性和碱性试验方法）规定。

3) 在老化以前的酸性指数或碱性指数应小于或等于 2.0，除非防腐油供方和买方之间另有协议。

(11) 老化试验。

1）B 型防腐油的预处理——为了模拟 B 型防腐油在高温下的储存，一份适当数量的防腐油应被加热到比熔化发生温度高 20℃的温度，并保持 168h。

2）试样准备——三杯防腐油和三块金属板。老化试验应按本标准的附录 B A 型和 B 型防腐油老化试验的试样准备和试验步骤进行。

3）老化以后，涂有防腐油的金属板应经受腐蚀试验[按 D—Ⅻ-b)]。

4）在杯中的防腐油应经受在 25℃下的渗透试验（对 A 型防腐油见 D—Ⅶ条，对 B 型防腐油见 D-Ⅷ条）。这平均渗透性值不应与该型式试验的平均值相差大于该型式试验平均值的 20%。

5）B 型防腐油的酸性和碱性指数试验（见 D—Ⅹ条）应执行。这酸性和碱性指数应小于或等于 2.5。

（12）腐蚀试验。

1）总则。对 B 型防腐油推荐的腐蚀试验按 D—Ⅻ-b）条规定。然而导线使用者通过与防腐油供应方的协议可以要求按 D—Ⅻ-c）条和/或 D—Ⅻ-d）条对 A 型或 B 型防腐油进行试验。

2）在板上试验。

a. 按 D—Ⅺ条规定准备和老化的三块钢板应垂直地放置在一个合适的小室中，并经受：

——当保持垂直时在含硫的气氛中 7 个 24h 循环。当每个循环的头 8h 时，小室内部的相对湿度应大于 90%，并在(40±3)℃的温度下应含有 0.067(体积)%二氧化硫。对该循环剩下的 16h，小室的门应打开，使处于实验室的气氛中。

——按 EN 60068—2—11 标准在(35±1)℃的温度下用含有 5(重量)% NaCl 的水溶液喷 168h，与垂直方向保持喷射角为 20°±2°。

b. 应用合适的溶剂将防腐油除去以后检查该板。

c. 在评价区[见图 3.1-7(a)和图 3.1-7(b)]斟酌带有最高腐蚀(程)度的板和在评价区斟酌带有最低腐蚀(程)度的板。

d. 基于图 3.1-6 所示的腐蚀板，用分级指数在余下的板上评价腐蚀(程)度。

e. 验收标准：分级指数应大于或等于 8。

在评价区中应仅有被限制的凹坑数和这些凹坑被限制的散布（范围）。评价区边上形成的凹痕与中部的凹坑相比其重要性是小的。

3）在线上试验。

a. 通过校直制备样品，第一种三根单线样品，由各一根裸钢线、镀锌钢线和铝线组成；第二种样品，由 3 根铝合金线组成一个样品，每根单线样品的长度为（150±10）mm、直径为 3.1～3.2mm，用最小纯度为 99.5%的铝线在每个端部上将样品扎在一起。这些单线的端部应用合适的化合物，如蜡或树脂密封。

b. 对 A 型防腐油，试样应均匀地涂上一层防腐油，其厚度为(100±10)μm。

c. 对 B 型防腐油，试样的整个长度应浸在 Q_m 以上(20±2)℃的防腐油中，并且允许垂直地流去。预备试验应识别该参数必定会产生一个(100±10)μm 的均匀厚度。这个可以通过使用对该防腐油的密度值(0.87g/cm³)增加试样的重量或者由防腐油制造厂提供密度值确认。

d. 试样应按 EN 60068—2—11 标准在(35±1)℃的温度下经受 5(重量)% NaCl 的水溶液喷(1000±10)h，试样垂直地悬挂。

e. 在这个期间的端部上，这些单线应被检验。这些单线应没有腐蚀、蚀刻、凹坑或变色的迹象，除由于防腐油的颜色以外。

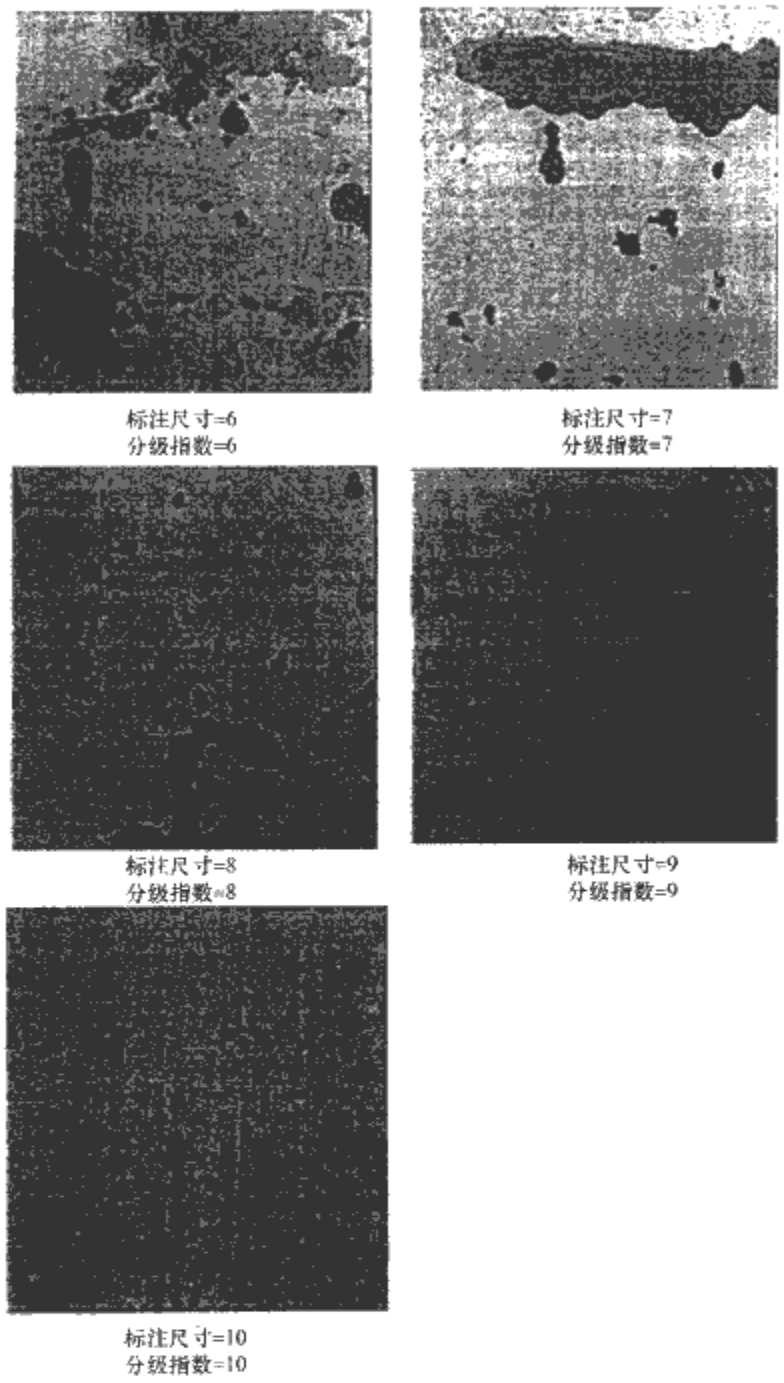


图 3.1-6　腐蚀(程)度的分级指数[见 D—Ⅻ—b)条]

4）在防腐油中的腐蚀物质。

a. 通过校直制备样品，第一种三根单线样品，由各一根裸钢线、镀锌钢线和铝线组成；第二种样品，由三根铝合金线组成一个样品，每根单线样品的长度为 75mm、直径为 3.1～3.2mm，用最小纯度为 99.5%的铝线在每个端部上将样品扎在一起。这些单线的端部应用合适的化合物，如蜡或树脂密封。

b. 对 A 型防腐油，试样应按 D—Ⅻ—c）—ⓑ条的叙述涂上一层防腐油，对 B 型防腐油按 D—Ⅻ—c）—ⓒ条的叙述涂油。

c. 试样应在空气中在（90±5)℃的温度下保持 24h。

d. 在这期间的端部上，这些单线应被检验。这些单线应没有腐蚀、蚀刻、凹坑或变色的迹象，除由于防腐油的颜色以外。

（13）在成品导线中防腐油的稳定性。

1）在稳定状态条件下的稳定性。

a. 一根导线样品，其代表规格由导线使用者选择，并根据导线使用者的要求涂防腐油，这根导线样品应用本标准附录 C（在稳定状态条件下的稳定性试验方法）规定的方法

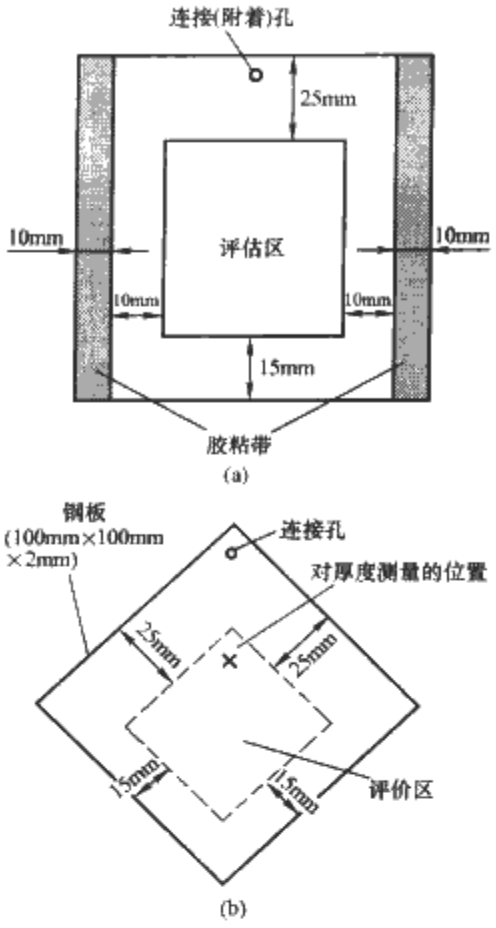


图 3.1-7 不同类型防腐油涂钢板建议的方法

(a) A 型防腐油涂钢板建议的方法；(b) B 型防腐油涂钢板建议的方法

进行试验。

b. 验收标准为：Q_4 应大于或等于最小经（受）得起的温度 Q_3。

2）在短路条件下的稳定性（这试验通常仅适用于企图用作地线的导线）。

a. 一根导线样品，其代表规格由导线使用者选择，并根据导线使用者的要求涂防腐油，这根导线样品应用本标准附录 D（在短路条件下稳定性试验方法）规定的方法进行试验。

b. 验收标准应由导线使用者和导线制造厂之间的协议（也即防腐油已从导线内部失去的重量百分数）。

5.5.5 防腐油买方和供方之间需阐明的信息

（1）防腐油供方应提供下列信息：①防腐油的最大安全工作温度是否保持（持续）在这个温度下大于 5min；②防腐油独特的名称或代码；③适用的防腐油的滴点；④对储存的建议；⑤在最高温度下 B 型防腐油可保持两个星期不会变质。

（2）防腐油买方应指明如下：①对成品导线试验的任一要求（见 D—Ⅹ Ⅲ条）和最小经受得起的温度 Q_3 和 Q_4；②短路条件（$kA^2 \cdot s$），在这条件下导线应经受得住没有明显的防腐油特性的损失。

注：对应于这个短路条件的最高导线温度可用 EN 608651：短路电流——第 1 部分：定义和计算方法进行计算。

5.5.6 欧盟某些成员国常使用的防腐油（见表 3.1-57）

表 3.1-57 欧盟某些成员国常使用的防腐油

国 别	A 型防腐油		B 型防腐油	
	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2
法 国	—	—	−20℃	105℃
德 国	—	—	−30℃	120℃

续表

国 别	A 型防腐油		B 型防腐油	
	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2
瑞 典	−20℃	225	—	—
联合王国	−20℃	125	−20℃	125℃
	−20℃	150	—	—

6 架空导线的型式试验

当架空导线的材料、结构（绞合）、主要工艺有所改变或产品标准中增加新的技术要求时，必须进行有关的型式试验。架空导线的型式试验往往带有模拟施工、线路运行的特征，所得的数据可供线路设计使用，而且也可对导线起到性能和质量验证的作用。因而，这些试验不同于通常已标准化的机电和物理性能的测试，它们具有专用性的特点。架空导线的型式试验包括：综合拉断力（常温或高温）、应力－应变、弹性模数、线膨胀系数、耐振动、抗蠕变、交流电阻、载流量、电晕、耐腐蚀（单线或绞线）、过滑轮、舞动、温度循环、渗水、短路、雷击和单线疲劳等试验。

6.1 架空导线（相导线）的型式试验

6.1.1 综合拉断力试验、应力—应变试验和弹性模数（量）

因为架空导线一般都属股线绞合（甚至几种材料）在一起的结构，所以当导线受力时就存在不同材料之间的应力分配（布）和相对移动问题，为此试样要长（一般其长度应为导线直径的 400 倍，且不少于 10m），取样严格，要求导线的材料之间不发生位移松动，否则影响试验结果，并且要用专用的拉力试验机和专用的导线夹头和夹具。试验方法可见 GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》（以下其他试验亦同）。

导线的综合拉断力除实测外，也可根据单线（股线）的抗拉强度和 1%伸长时的应力进行大致的计算

$$P_B = an_a\sigma_a f_a + bn_s f_s\sigma_{1\%}$$

式中：a、b 为由于绞合引起股线强度损失的系数（见表 3.1-58）；n_a、n_s 为铝、钢单（股）线根数；f_a、f_s 为铝、钢单（股）线截面，mm^2；σ_a 为铝或铝合金线抗拉强度，MPa；$\sigma_{1\%}$ 为镀锌钢线 1%伸长时的应力，MPa。

表 3.1-58 强度损失系数

导 线 类 别	a	b
LJ 37 股及以下	0.95	—
37 股以上	0.90	—
LHJ	0.95	—
LGJ 及 LHGJ	1.0	1.0
GLGJ	0.93	0.98

在与综合拉断力试验的同样条件下，施加不同的负荷，并测定伸长，获得不同负荷循环下的应力－应变曲线，由曲线的直线部分计算出起始和最终弹性模数（量）。

导线的弹性模数也可进行大致的计算

$$E = \frac{E_s + 0.85KE_a}{1+K}$$

式中：E_a、E_s 分别为铝线和钢线的弹性模数，MPa；K 为铝、钢截面比。

6.1.2 线膨胀系数的测量

单位长度的导线每升高 1℃的长度变化值，称为该导线

的线膨胀系数。在架空输电线路设计中，计算导线伸长和受力状态，线膨胀系数是另一重要参数。导线受热后的长度增量为

$$\Delta L = \alpha(\Delta t)L$$

式中：α 为线膨胀系数，1/℃；Δt 为温升，℃；L 为导线长度，m。

将试件通电加热，在逐级温度下，测定伸长，直至试验温度加到导线的最高允许使用温度时为止。据测试数据绘出温度—伸长曲线，曲线的直线部分的斜率，即为所求的线膨胀系数，并按下式计算

$$\alpha = \left(\frac{\Delta L}{L\Delta t}\times 10^{6} + C\right)\times 10^{-6}$$

式中：L 为试件标距长度，mm；Δt 为温度增长，℃；ΔL 为温度增加 Δt 时的热伸长，mm；C 为设备校正系数。

组合导线（绞线）的线膨胀系数，也可用下式进行近似计算

$$\alpha = \frac{\alpha_s E_s + K\alpha_a E_a}{E_s + KE_a}$$

式中：α_s、α_a 分别为钢、铝单（股）线的线膨胀系数，℃$^{-1}$；E_s、E_a 分别为钢、铝单（股）线的弹性模数，MPa；K 为铝、钢截面比。

6.1.3 耐振动试验

在架空线路上，导线的振动疲劳断股主要发生在悬挂导线的线夹的出口处，振动角越大，股线所受的动弯曲应变量也愈大，越容易引起疲劳断股（线）。导线的危险振角一般不大于 20′。为严格起见，我国按振动为 30′进行振动试验。振动试验档距不小于 50m，在模拟线路悬挂导线的条件下，施加的试验张力为导线计算（额定）拉断力的 25%，按正弦波振动，振动角为 30′，振动次数达 3×10^{7} 次后导线未发现断股者，应判为合格。如 3 根试件中有 1 根不合格者，应另取 2 根再试验，补做 2 根均合格，则认为该批振动试验合格。若仍有 1 根不合格时，则认为该批产品的振动试验不合格。

6.1.4 蠕变试验

金属在温度、外力和自重的作用下，随着时间的推移，将缓慢地产生不能复原的永久变形，这种现象称为蠕变。架空导线在风压、冰载、气温变化和张力及自重等情况下长期使用，也必将产生蠕变伸长，使弧垂增大。有可能导致对地距离不足，造成送电事故。因此研究、试验架空导线的蠕变特性，以便合理地设计电力线路的杆塔高度和档距，避免各种送电事故是非常必要的。

架空导线的蠕变伸长与导线的材质、结构、架线方式、初期的预应力大小、架线后的应力、负荷情况和线路的气象条件等因素有关。试验室的蠕变试验条件，应尽量满足工程使用要求。蠕变试验的结果应有一定的重复性和可比性。

架空导线的蠕变过程，大致分三个阶段。第一阶段蠕变伸长极快，大约只有几个小时。第二阶段蠕变速率渐趋稳定，并达到一个稳定值。第三阶段蠕变伸长又迅速增大直至断裂。

蠕变试验可在立式或卧式的蠕变试验机上进行，试件温度和环境温度视试验要求而定，试验张力一般为计算拉断力的 25%～40%，试验周期 1000h 或 2000h，蠕变伸长的测量装置应能测出 2mm/km 的应变。试验数据在双对数坐标纸上绘出应变—时间图形，并确定出从试验开始到建立直线定律为止的时间。蠕变伸长是材质、温度、应力和时间的函数。按试验的应变—时间曲线，可用下列数学方程表示

$$\varepsilon_t = at^{\mu}$$

式中：ε_t 为 t 小时的蠕变伸长，mm/km；t 为蠕变时间，h；a 为随材质、温度、应力而定的系数；μ 为由试验确定的系数。

6.1.5 交流电阻测量

导线单位长度的交流电阻是计算载流量的一个必要参数。交流电阻是在电流方向交变的情况下，由于磁场效应、集肤效应和邻近效应的影响，使电阻增大而产生的。导线的铝股线表面具有绝缘性的氧化铝膜，所以导线中的电流是沿着铝线股作螺旋方向流动的，从而在导线轴线方向形成磁场。虽然导线中相邻层的铝线绞制方向相反，可抵消部分磁化力，但剩余的交变磁场强度，仍可使钢芯产生磁滞和涡流，导致功率损耗。又因集肤效应和邻近效应能使导线中的电流分布发生变化，使导线电阻增大。

按交流电阻测试线路图测得的结果，必要时，可根据测试结果，绘出交流电阻与试件温度的关系曲线和交直流电阻比与电流的关系曲线，以便于计算不同情况下的载流量。

6.1.6 载流量的实验与计算

架空导线的载流量是电力线路计算传输容量的重要参数。导线载流量取值太高，则导线发热严重，导致导线的强度损失较大，降低了导线的使用寿命。若载流量取值太小，则不能充分发挥线路的经济效益，故应综合考虑，采用合理的载流量数值。导线载流量的大小主要与导线本身的电阻、外径、允许使用温度、环境温度、风速、日照强度等因素以及导线的结构、表面状态情况有关。例如相等截面的钢芯铝绞线，双层铝线的结构就比单层铝线的载流量大些，因为双层铝线结构的交流电阻较小。

导线的载流情况有三种：一是无风无日照的载流，二是无风有日照的载流，三是有风有日照的载流。如上一节 6.1.5 交流电阻测量所述，在密封的恒温箱中测得的电流和温升数值，绘成电流—温升曲线，就可获得无风无日照的载流量试验结果。有日照和风速的载流试验条件目前尚难实现，故只能在专门的实验基础上，采用计算的办法来实现。这些计算都是根据交流电阻测试的结果进行的。有关载流量的计算和交流电阻的计算建议用《电线电缆手册》（参考文献 1-[2]）第 105 页介绍的方法进行。

6.1.7 电晕试验

高压电力线路上的导线，当其表面的电场强度大于某一数值时，可使大气中的气体分子发生电离，形成自激导电产生的可见光晕，这种现象称为电晕。开始出现全面电晕放电时的场强，称为全面电晕场强。电晕场强的大小主要与线路的工作电压、分裂导线的根数、直径和气象条件等因素有关。电晕放电的同时，还将伴生高频噪声、无线电干扰，甚至发生导线舞动，并导致电能损耗。因此导线表面的电场强度必须加以限制。一般应使导线表面的最大工作场强，不超过全面电晕场强的 90%，以避免产生可见电晕。导线的全面电晕场强 E_0(kV/cm)可按下式计算

$$E_0 = 30.3m\delta\left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}}\right)$$

式中：m 为导线表面系数，对多股导线 $m=0.82\sim0.9$；δ 为相对空气密度，$\delta=2.90p/(273+t)$（$p=101$kPa、当 $t=$

20℃时、$\delta=1$)；p 为大气压，kPa；t 为气温，℃；γ 为导线半径，cm。

上式的最大缺点是没有考虑到湿度对电晕放电的影响，所以必须进行包括湿度条件在内的电晕试验。在一般情况下阴雨天气容易引起电晕放电，但在某种情况下也有逆变现象。

电晕试验在人工气候筒内进行，试件有效长度为 4m，筒内空气密度（如相对空气密度为 1.0～0.69，相当于海拔 0～3000m）、湿度和温度可任意调节。试件水平放置，对地高度不小于 5m，最大弧垂不超过 5cm，用工频试验变压器的输出端接到试件两端。相对湿度为 30%～80%等各种条件下的全面电晕试验，试验电压由小变大，逐步升高直至试件表面开始出现电晕放电为止。对于分裂导线，可将试件按规定的排列方式和线间距离，平行放置于筒内进行试验。将试验用的相对空气密度值，按相对空气密度与海拔的关系曲线，查出相应的海拔高度，据试验要求和试验的数据，计算分析试件表面的全面电晕场强与海拔、湿度和试件直径的关系曲线。由此评估试件最大工作电压时的表面场强是否小于或等于试验的全面电晕场强的 90%。

6.1.8 单线疲劳试验

当金属线材所受的弯曲应力超过某一极限值时，在长期的反复弯曲交变应力作用下，将发生疲劳断股。这一应力值被称为该线材的疲劳极限。架空导线在发生振动或舞动时，股线即处在反复弯曲交变应力作用之下，故架空导线采用新的线材或工艺条件有所改变时，应进行疲劳试验。

疲劳试验可在旋转反复弯曲疲劳试验机上进行。试验机的工作原理见图 3.1-8。在试件中心轴线的外侧，试件表面受拉应力。在试件轴线的内侧，试件表面受压应力。在电机的带动下，使试件按其弯曲轴线高速旋转，在反复弯曲应力的作用下，直至疲劳破断。试件所受的弯曲应力与偏转角的大小和试件的弹性模量有关，可按式计算

$$\Delta_B = \frac{d\theta E}{357.7L} \quad (\text{MPa})$$

式中：d 为试件直径，mm；θ 为偏转角，(°)；E 为弹性模量，MPa；L 为试件长度，mm。

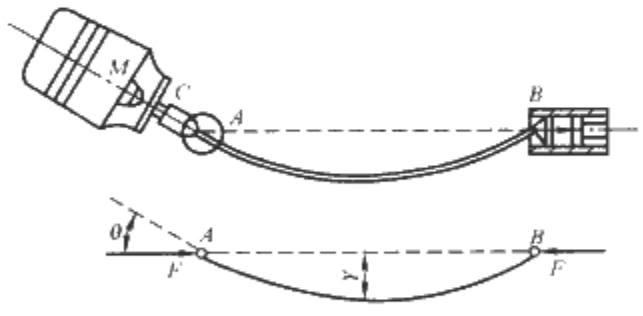


图 3.1-8 线材疲劳试验机原理图

一般钢线的反复弯曲疲劳极限相应的应力交变次数应不少于 1000 万次。有色金属线材应力交变次数应不少于 3000 万～5000 万次。

试验用试件的有效长度为本身直径的 150 倍。对于直径较大或材质较软的线材，有效长度可适当小一些。将不同的反复弯曲应力与相应的应力交变次数绘成曲线。对于有色金属试件至少 3000 万次后不出现破断，这一反复弯曲应力称为该试件在此条件下的“疲劳极限”，其值应为不少于 5 个试件的平均值。

6.1.9 耐腐蚀试验

金属表面如有能与其发生化学反应的媒介，或与不同的其他金属或盐类接触，同时又存在水分或其他电解质，就将发生金属腐蚀，甚至使金属构件破坏，造成严重的经济损失。如电力线路在工业地区或沿海地区架设的架空导线，腐蚀现象就很严重，多者十几年，少则 2～3 年就得换线。除换线的直接经济损失外，因停电造成工业减产的间接经济损失更是十分惊人。腐蚀试验的目的主要是作为一种手段，为研究消除产生腐蚀的各种因素或尽量减缓腐蚀过程创造条件。

金属腐蚀主要有化学腐蚀和电化学腐蚀两种。大多数情况下，这两种腐蚀情况往往又是同时存在的。

化学腐蚀指金属在大气中与氧、氯、二氧化硫、硫化氢等气体作用发生的腐蚀。金属表面与氧发生作用后，生成不同的金属氧化物。铝的氧化物能构成致密的有一定硬度的表面保护膜。铁的氧化物结构疏松，易于脱落，并继续不断地向金属内部渗入、扩散，使材料破坏。铜的氧化物俗称铜绿，介于以上两者之间，是一种有毒物质。大气中的其他有害气体或离子如氯离子、碳酸根离子、游离碱或硫酸等，容易与金属或其氧化物引起化学反应，使金属加速腐蚀。

电化学腐蚀指由金属和介质组成原电池后，形成了金属的腐蚀过程。当两种不同电极电位的金属相接触，其间又有水或其他电解质，两种金属之间就会产生电流，形成一个原电池，其中一种金属处于正电位，另一种处于负电位。处于负电位的金属就不断地以离子状态经电解液向处于正电位的金属聚积。使处于负电位的金属逐渐损失破坏，形成电化学腐蚀。两种金属的电极电位之差愈大，电化学腐蚀就愈强烈。温度愈高、湿度愈大，金属的腐蚀在一般情况下也愈严重。不同的金属有不同的电极电位。常用的几种金属的电极电位次序见表 3.1-59。

表 3.1-59 常用金属的电极电位

金 属	Ag	Cu	Pb	Sn	Fe
电 位	+0.80	+0.334	−0.122	−0.16	−0.44

金 属	Zn	Al	Mg	Na
电 位	−0.76	−1.33	−1.55	−2.76

电极电位负值越大的金属，转入电解质中成为离子的趋势越强，即越易受到腐蚀。铝的电极电位的负值虽较大，但由于其表面经常有一层氧化膜保护层，能改善其耐腐蚀性能。

架空电力线路上的各种导线，特别是架设在沿海和工业地区的导线，长期经受大气、风雨和盐雾的侵蚀，很容易受到腐蚀。这是由于大气中的氯离子半径很小，能自由地穿透金属表面的水膜和钝化膜（金属化合物，结构紧密，复盖在金属表面），排挤氧离子并取而代之，成为可溶性氯化物，使金属加速腐蚀。大气中的 SO_2、H_2S、NH_3 和 NO_2 以及其他悬浮粒子和灰尘也都能促进金属的腐蚀。腐蚀后使金属表面产生缺陷，导致应力集中。应力又会促进腐蚀，腐蚀又加速了表面缺陷的扩展，使抗疲劳能力下降，从而大大降低了导线的使用寿命。

为了防止导线的腐蚀，目前采取的主要方法是在钢芯的钢线上镀锌或镀铝。或在导线绞制过程中，在股线上涂以防腐剂。另外，提高铝导线铝材的品位和导线的表面质量也是提高导线耐腐蚀性能的有效途径。

腐蚀试验，除大气暴露试验以外，目前常用的方法是人

工加速腐蚀试验。如盐雾腐蚀试验和二氧化硫气体腐蚀试验等。

盐雾腐蚀试验在盐雾腐蚀试验箱中进行：喷雾溶液 3% NaCl 溶液；试验温度 35℃以下；相对湿度 90%以上；喷雾时间 30min，并加热 30min，或其他按规定的间隔时间，根据试验要求而定；样品水平或呈一定角度（15°～30°）放置；试验周期一般试验持续时间为 500～1000h，也可根据试验的目的和要求而定。

二氧化硫气体腐蚀试验在人工气体腐蚀试验箱内进行：二氧化硫浓度，1%体积比（范围为 0.5%～2.0%）；试验温度，25℃±2℃；相对湿度，95%以上；试验时间，24h。

对试验结果，首先要外观检查，了解腐蚀产物的颜色、状态、结合程度、腐蚀类型及腐蚀物分布特征等。然后，测定重量，测定试件腐蚀后的失重或增重，并加以分析和说明。最后测定腐蚀后机械性能及电阻，对比腐蚀前、后机电性能的影响。

6.2 光纤复合（组合）架空地线的型式试验

光纤复合架空地线的型式试验包括电学、机械物理和光学性能。IEC 1396《OPGW 的电气、机械和物理性能要求及试验方法》及我国行业标准 JB/T 8999—1999《光纤复合架空地线》有详细规定。主要有应力—应变试验、抗拉特性试验、滑轮试验、微风振动试验、舞动试验、蠕变试验、温度循环试验、水渗透试验、短路试验、雷击试验。

（1）应力—应变试验。

1）应力—应变试验是决定光纤复合架空地线在负载情况下的机械行为。

2）试样长度不小于 10m。试验前样品两端用预绞丝、压接管、环氧树脂、低熔点合金等任一种方式处理，使端部予以固定，光纤尾端不能相对移动。

3）拉断强度试验。光纤复合架空地线应能承受不小于 95%计算（额定）拉断力，而此时应没有任何一根单线断裂，终端夹具也没有任何位移。

（2）抗拉特性试验。

1）抗拉特性试验是决定光单元在拉力负荷下的行为，即决定下列性能：光纤的衰减变化、光纤应变和应变余量（注：光纤应变和应变余量测量只对于松套管结构）。

2）试样长度应大于 10m。光纤试样长度至少 100m。夹头的处理与应力—应变试验相同，试验过程中光纤复合架空地线的绞线应无明显损伤。在进行加载的同时进行如下测量：在适当间隔时间加载，测量缆伸长或缆应变，同时测量光纤长度和光衰减变化。光纤长度测量用 OTDR，光纤衰减则用光功率计。当光纤开始与缆同步伸长时，缆的应变称为应变余量，在光纤产生应变之前光单元相对于地线单元不会发生相对移动。

3）试验结果分析：有下列两种情况之一者，则认为不合格。当光纤复合架空地线的光衰减值增加至大于最大允许负载下光纤的衰减值时，或应变余量小于相对应的最大允许负载的规定值。

（3）滑轮试验。

1）滑轮试验是为了证实光纤复合架空地线在安装架设时不会损害或降低它的性能。试验装置、试验条件及试验程序共两种，试验时可任意选择其中的一种。

2）试验程序，用不小于 50m 的试样在 15%计算（额定）拉断力的拉力下进行试验，通过滑轮的试样超过 30m。第一循环后，在试样的起端、中点和末端作标记。试验完毕后，剥除试验部分的绞线层，测试缆和其组成部分每个标记点的椭圆度，并作比较。整个试验中用光功率计测量光衰减。

（4）微风振动试验。

1）微风振动试验是为了评价缆的疲劳性能和光纤在微风振动下的光学特性。

2）试验完毕后，若光纤衰减增大超过规定值，光单元的最大允许椭圆度超过规定值，或绞线断股损伤、形成灯笼状时，均认为样品不合格。

（5）舞动试验。

1）舞动试验是为了评价缆抗舞动的疲劳性能和光纤在典型舞动下的光学特性，本试验在用户要求时才进行。

2）试验完毕后，若光纤衰减增大超过规定值，光单元的最大允许椭圆度超过规定值，或绞线断股损伤、形成灯笼状时，均认为样品不合格。

（6）蠕变试验（当有要求时）。

1）试样长约 10m 或以上，缆每端用适当夹具夹住，施加至少 25%计算（额定）拉断力的负荷，试验时间 1000h。

2）试验程序可参照 IEC 1396 蠕变试验的有关要求。

（7）温度循环试验（当有要求时）。

1）温度循环试验是为了考察缆在工作环境的温度范围下的光学特性。

2）光纤芯数、温度循环的温度范围和变化过程、保温时间，由用户按工程情况提出，保温时间不超过 24h。试验时光纤长度最少为 500m，循环次数 2～10 次。

3）试验完毕，光衰减增大不应超过规定值。

（8）水渗透试验（当有要求时）。水渗透试验只对含有合适阻水化合物的光单元进行，长度为 1m 的样品开口端应无水渗漏进入。如果第一个试样试验失败，应从与第一个试样紧邻部分重取 1m 长试样进行试验，合格才能通过。

（9）短路试验。

1）短路试验是检测光纤复合架空地线的性能和光纤在典型短路条件下的光学特性。

2）本试验可使用两个或一个试样的方式来试验。测试条件如下：

拉伸负荷：10%～20%计算（额定）拉断力。

试样有效长度：不小于 2m。

试验光纤长度：不小于 100m。

脉冲次数：不少于 2 次。

波形：第 3 次循环以后对称。

试样的起始温度和电流容量 I^2t 由供需双方协商决定。

3）测试程序。每次电流脉冲之前，连续测量光纤衰减，不小于 2min，脉冲之后，测量 5min，并测量缆和光单元的温度。两次脉冲之间，应让缆的温度冷却到初始温度的±5℃之内，才能施加第二次脉冲电流。

4）试验结果分析。试验完毕后，实测结果，光纤的光衰减的增大值，光纤复合架空地线的任何组成部分的温升（即达到的最高温度值）都应该在允许的范围内。试验后，把缆剖开，缆的任何部分都应无损伤。试验后的试样，其抗拉断力应不小于 95%计算（额定）拉断力。

（10）雷击试验。雷击试验可分两种。

1）给定条件下的验证试验。

a. 本试验在不小于 30m 长的试样中点上进行，光纤的最小长度为 100m，连接于光纤任一端的光功率计测量光纤的衰减值。

b. 试样应承受四部分组成的模拟雷击：起始冲击、中间电流、连续电流、再冲击。

c. 冲击前温度 40℃±5℃，两次脉冲间又必须回到起始的温度。

d. 雷击模拟试验共 5 次，施加在同一样品上，但不必总在同一处。

2）确定光纤复合架空地线抗雷击的承受性能的试验。

a. 试验装置中铁棒用作电极，置于试样的正上方，电极和缆用保险丝连起来，试样上施加 2%计算（额定）拉断力或 2kN 力。

b. 电能量逐步增加直至光纤复合架空地线发生断股为止。

第2章 铜 导 体

中国已居电工用铜的世界第一，2006年铜导体用量已达到354万t。中国又是一个缺铜的国家，因此废铜直接用于铜导体生产是必然趋势，也具有适用的市场，但目前我国废铜直接利用，铜导体质量低、能源消耗多、环境污染严重、铜杆标准适用性差，甚至不执行标准，这些问题需要从不同的层面上解决。从技术上说主要问题在废铜直接应用的前处理和熔炼的工艺及它们的装备。另一方面，随着铜导体生产向高速化、细径化（ϕ0.071～ϕ0.013mm线，断头率要超过100kg/每断1次）、多根出线拉线（8、16、24、…、40根）和拉线—退火—镀锡—绞合（束合）工序的连续一条龙生产的发展，对阴极铜和铜杆的质量要求也越来越高，其中推动技术进步的目标是要提高电工铜杆的可轧性、可拉性和可退火性，更具体地说是要减少电工铜杆中的夹杂（金属夹杂—铜氧化物、其他杂质氧化物、外来铁夹杂和非金属夹杂）和提高表面质量，从而降低拉线断头率和改善漆包线用铜线的柔软性。尽管漆包线用的专用铜杆标准还未订出，但技术改进的方向和评估方法，已日趋明朗。随着铜价暴涨，铜、铝差价变大，推动了新一轮的以铝节铜的发展，也就是说从产品和应用的总体来看该用铜的地方还应用铜，但在可用和可不用铜的地方，也就可能用铝、铝合金和铜包铝、铜包钢等双金属线作导体。这要由产品设计和用户来选择。导体用铜共有两类，一为韧铜，另一类为无氧铜，两者旗鼓相当，谁也代替不了谁，两者都能制造出合格和符合高性能要求的各种导体，可以说各有特点和不足。正因为如此，正拟开发的在连铸连轧生产线上浇铸无氧铜，两者合二为一，这项工作已有了一定的进展。中科院金属研究所在铜方面已有两项重要发现：首先发现“高密度、高纯度的纳米铜具有室温超塑延展性”，另外发现“纳米孪晶纯铜具有高强和高导电性”，今后的任务应放在把发现转为技术，向产业转化。

1 铜导体的原材料——阴极铜

铜导体用的原材料为阴极铜(又称电解铜)，有两种即高纯阴极铜［又称A级铜或4N铜(99.99%铜)］和标准阴极铜。

1.1 高纯阴极铜（Cu—CATH—1）

据GB/T 467—1997《阴极铜》规定，其化学成分如表3.2-1所示。这种成分的高纯阴极铜早在1980年11月20于巴黎举行的铜生产厂和使用厂会议上讨论起草，并作出规定。在作出成分规定的同时，亦对铜导体的电导率和螺旋伸长数作出了原则性的提示。

表3.2-1 高纯阴级铜(Cu—CATH—1)化学成分(%)(GB/T 467—1997)

元素组	杂质元素	含量，不大于	元素组总含量，不大于	
1	Se	0.000 20	0.000 30	0.000 3
	Te	0.000 20		
	Bi	0.000 20		
2	Cr	—	0.001 5	
	Mn	—		
	Sb	0.000 4		
	Cd	—		
	As	0.000 5		
	P	—		
3	Pb	0.000 5	0.000 5	
4	S	0.001 5①	0.001 5	
5	Sn	—	0.002 0	
	Ni	—		
	Fe	0.001 0		
	Si	—		
	Zn	—		
	Co	—		
6	Ag	0.002 5	0.002 5	
杂质元素总含量			0.006 5	

注 ①需在铸样上测定。

电导率——对符合上列成分的铜应达到电导率为101.0% IACS，所以在正常的情况下要求电解铜在进一步加工成线杆后应具有101.0% IACS的最小电导率。

螺旋伸长数（Spiral Elongation Numbers，SEN）——由电解铜生产的线杆所测得的螺旋伸长数仅控制为350mm。

所谓SEN是用螺旋伸长法测定的，以SEN值（mm）来评估材料的柔软度（可退火性，再结晶行为）的一个指标。材料纯度比较高，可退火性比较好，则SEN就大。阴极铜从冶炼方法上有电解精炼阴极铜和电沉积阴极铜之分。由于电沉积阴极铜可比电解精炼铜做得更纯，所以电沉积铜的SEN值可比电解精炼铜的大50～100mm（电解精炼铜的SEN值通常为400～440mm）。

随着对高质量铜杆需要量的增加，现在用于电子、通信和汽车等工业用的细线、微细线、超微细线、多根出线拉线的铜导线采用Cu—CATH—1阴极铜制杆已是比较普遍的了。

1.2 标准阴极铜（Cu—CATH—2）

据GB/T 467—1997《阴极铜》规定，其化学成分如表3.2-2所示。

对铜导体的生产者和使用者来说，氢和氧是需特别关注和有严重影响的两种元素，但在上列化学成分中均未作明确的规定，这并不是说氧和氢在阴极铜中的存在及其数量对后续加工及制品的性能没有影响。

表 3.2-2 标准阴极铜（Cu—CATH—2）化学成分 %

Cu+Ag 不小于	杂质含量，不大于									
	As	Sb	Bi	Fe	Pb	Sn	Ni	Zn	S	P
99.95	0.001 5	0.001 5	0.000 6	0.002 5	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002 5	0.001

注 1. 供方需按此测定标准阴极铜中的铜、砷、锑、铋含量，并保证其他杂质符合本标准的规定。
2. 需方如对产品中氧含量有特殊要求，由供需双方协商确定。

阴极铜和铜杆的质量受到氢和有机添加剂的影响。阴极铜中含有高的氢时，就呈现出过多的边缘瘤、微裂、不均匀晶粒组织的表面特征和内部的多微孔性。如图 3.2-1 所示由于氢在晶粒边界上析出，所以在铸条中显示出明显的枝晶间的微孔。电解铜中的氢来自电解液和有机添加剂，电解铜经熔化成铜液，在铜液中的氢除在晶粒边界析出外，也与有害的杂质共同作用，在热轧时产生开裂。也已经发现，在阴极铜中碳含量高则氢含量也高。在连续铸条中由氢引起的多微孔性将是在杆中产生内部缺陷（中心爆裂）的原因之一。因此，电解铜中的氢高与获得性能不良的铸条和铜杆有关。但对铜中氢的测定是很困难的，如果在电解铜板上取样测量，在电解铜板中测定的氢含量与浇铸时的表观氢含量和行为约有 80%的相关性。至今对电解铜板中氢的测量还没有精密的仪器，从而导致对熔体金属要测定其表观氢含量也没有精确的仪器。在电解铜板中测出的许多氢，在电解铜板熔化时可能就被驱除出去了，由此就不能很好地预报熔体金属的氢含量和与金属有关的“可铸性”。

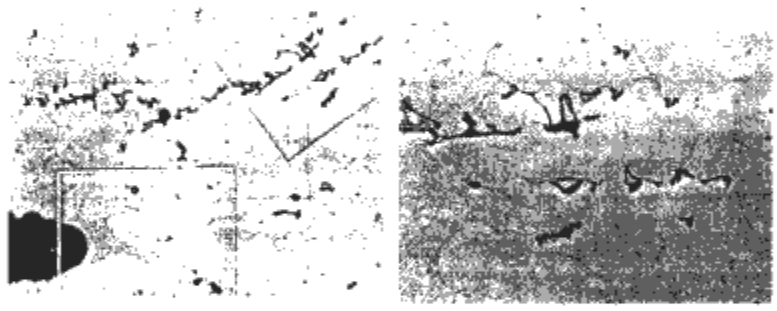


图 3.2-1 由于氢在晶粒边界上析出，导致枝晶间的微孔

在阴极铜中的含氧量一般在$(10\sim50)\times10^{-6}$，并不高，由相图可知，在常温下氧在铜中的固溶度约为 2×10^{-6}。低氧铜杆的含氧量一般在$[200(175)\sim400(450)]\times10^{-6}$，而无氧铜杆的含氧量一般在 10×10^{-6} 左右。氧在铜中存在与铜和杂质形成氧化物夹杂在晶间分布，影响后续加工和制品的性能。图 3.2-2、图 3.2-3 和图 3.2-4 示出了在铜铸条中沿着 Cu_2O 边界分布的多孔性、在氧化物共晶区氢集结引起的大空洞和由于 Cu_2O 微粒的存在，在拉线时引起中心爆裂。当含氧量约大于 10×10^{-6} 时，就会对铜导体的电导率产生不利的影响，见图 3.2-5。

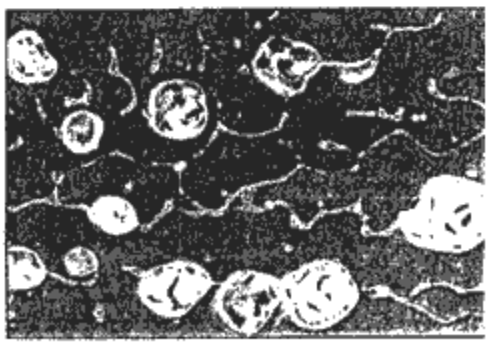


图 3.2-2 沿 Cu_2O 边界分布着过多的微孔（暗场，100 倍）

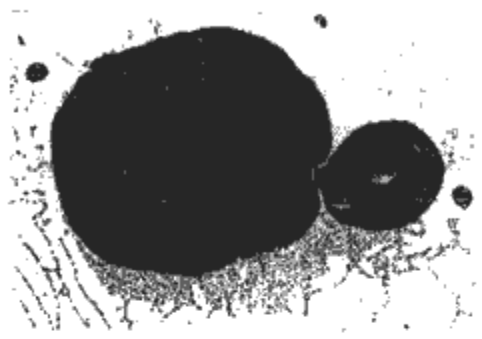
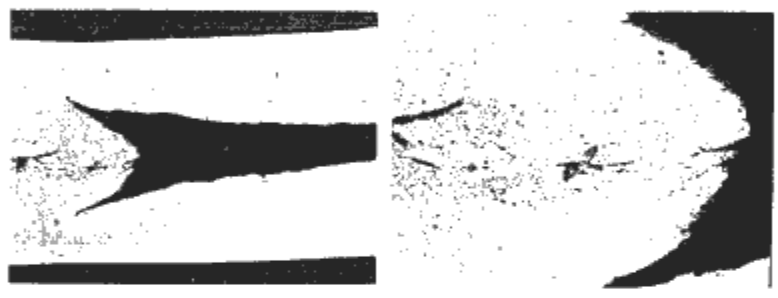


图 3.2-3 在氧化物共晶区氢集结引起的大空洞（100 倍）



(a) (b)

图 3.2-4 中心爆裂断线图
(a) 由于 Cu_2O 微粒和集结的微孔存在，在拉线时引起线的中心爆裂断线；
(b) 3.2-4 (a) 中心部分的放大

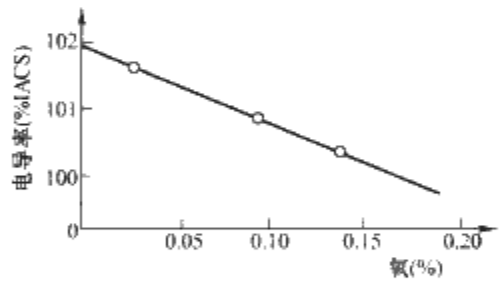


图 3.2-5 铜中氧含量和电导率的关系

阴极铜是一种原材料，可以被熔化、铸造和加工成所需的制品。在后续加工过程中，由于加工方法和工艺的不同，氧可能升高（如制造韧铜杆）、也可能会下降（如制造无氧铜杆）；氢也由于加工方法、工艺和操作的优和劣，有可能升高或下降，总之不希望氢继续升高，正因为这个原因，也就对阴极铜中的氧和氢未作明确的规定。

改变阴极铜的材料，即使系统的加工参数不变，可改变铜杆的质量。除氢和氧以外，在阴极铜中最常见的杂质有硒、碲、铋、锑、铅、砷、铁、镍、硫和银。这些杂质往往主要以氧化物夹杂的形态分布在铜晶粒之间、对铜导体的加工和性能产生影响，在后文中将分别作深入的阐述。像上述的氢那样，铸条也易受杂质的很大影响，当某些杂质如铅、铋、锑、硒、碲和硫的总量比较高时，就能在铸条中引起“热脆性”（像铋还能引起拉线时的“冷脆性”），招致铸条产生开裂，在热轧杆的表面上产生缺陷。这种质量的恶化表现在：在杆的表面产生小的“V”形开裂；在杆的皮下氧化物夹杂影响范围大；内部微孔多（与 Cu_2O 的共晶粒子有关），

这种杆对拉线就成了问题，特别对漆包线的生产，在多根出线的拉线机中招致过多的断线。各杂质中最有害的，也就是说以最小的含量却产生最大负面影响的杂质是铋，它的含量不到 1×10^{-6} 时就可对铜的可退火性产生不希望有的、可测量出的影响。在铸造和轧杆过程中，1×10^{-6} 的铋能使线杆产生裂纹，通常是微裂纹（热脆）；硒和碲是另两个不到 2×10^{-6} 的含量即可对可退火性产生负面影响的元素。当在较高的含量水平下［（5～10）$\times10^{-6}$］，这两种元素也会构成线杆的裂纹问题，上述这3种元素集中在一起似乎还存在着一种集合的效果，因此，在技术标准中还有一个总量的限制；铅和硫在类似的含量水平下，可引起类似的铸造和轧制的缺陷，但对可退火性的影响就小得多；镍和铁都影响铜的电导率，但却不太明显，除非其含量大于 10×10^{-6}；银含量大于 25×10^{-6} 时，对可退火性和导电性能的影响逐渐增加。

据 GB/T 467—1997《阴极铜》对 Cu-CATH-2 阴极铜化学成分的规定及标准前言中表明：我国 Cu-CATH-2 阴极铜与美国标准 ASTM B115 中的2号阴极铜相比，我国“标准阴极铜的铋含量比较高、而铅含量比较低；对锌和硫作了规定，而对硒和碲未作规定，ASTM B115 与此相反，对硒和碲作了规定，而对锌和硫未作规定”。从上可知，铋、硒、碲是有严重影响的有害杂质，因此，在标准中应对铋降低含量，并明确规定对硒和碲的限量，按美国和国际先进标准等同采用与国际接轨。硫和铅都具热脆性，在我国标准中作出规定是好的，应在标准中继续保留。

1.3 加工铜化学成分和产品形状❶

本节列出的（表 3.2-3）加工铜化学成分和产品形状和（表 3.2-4 无氧铜牌号对照是仅供读者参考用的）。有关电工用的铜杆、铜线和铜型材等另有电工用的专用标准，请勿误用。从表 3.2-3、表 3.2-1、表 3.2-2 相对照可以看出：阴极铜加工成铜加工制品后，由于不可避免的污染，往往杂质含量是有所上升的；由上引法制造的无氧铜杆，其实际含氧量只在 10×10^{-6} 左右。

表 3.2-3　　加工铜化学成分和产品形状

组别	序号	牌号		化学成分（%）													产品形状
		名称	代号	Cu+Ag	P	Ag	Bi①	Sb①	As①	Fe	Ni	Pb	Sn	S	Zn	O	
纯铜	1	一号铜	T1	99.95	0.001	—	0.001	0.002	0.002	0.005	0.002	0.003	0.002	0.005	0.005	0.02	板、带、箔、管
	2	二号铜	T2②	99.90	—	—	0.001	0.002	0.002	0.005	—	0.005	—	0.005	—	—	板、带、箔、管、棒、线、型
	3	三号铜	T3	99.70	—	—	0.002	—	—	—	—	0.01	—	—	—	—	板、带、箔、管、棒、线
无氧铜	4	零号无氧铜	TU0③（C10100）	Cu 99.99	0.000 3	0.002 5	0.000 1	0.000 4	0.000 5	0.001 0	0.001 0	0.000 5	0.000 2	0.001 5	0.000 1	0.000 5	板、带、箔、管、棒、线
				Se：0.000 3　Te：0.000 2　Mn：0.000 05　Cd：0.000 1													
	5	一号无氧铜	TU1	99.97	0.002	—	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.003	0.002	0.004	0.003	0.002	板、带、箔、管、棒、线
	6	二号无氧铜	TU2	99.97	0.002	—	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004	0.003	0.003	板、带、管、棒、线
磷脱氧铜	7	一号脱氧铜	TP1（C12000）	99.90	0.004～0.012	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	板、带、管
	8	二号脱氧铜	TP2（C12200）	99.9	0.015～0.040	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	板、带、管、棒、线
银铜	9	0.1银铜	$TA_g0.1$	Cu 99.5	—	0.06～0.12	0.002	0.005	0.01	0.05	0.2	0.01	0.05	0.01	—	0.1	板、管、线

注　经双方协商，可限制表中未规定的元素或要求加严限制表中规定的元素。

本表引自 GB/T 5231—2001《加工铜化学成分和产品形状》。

① 砷、铋、锑可不分析，但供方必须保证不大于界限值。

② 经双方协商，可供应 P 小于或等于 0.001%的导电用 T2 铜。

③ TU0［C 10100］铜量为差减法所得。

表 3.2-4　　无氧铜牌号对照

国别	GB（中国）	ISO	ASTM（美国）	JIS（日本）	ГОСТ（俄罗斯）	DIN（德国）	BS（英国）	NF（法国）
牌号	TU0、TU1、TU2	Cu-OFE Cu-OF	C10100 C10200	C1011 C1020	МООБМО$_a$ МООБМ1$_a$	— OF-Cu	C103 C110	Cu—C2 Cu—C1

❶ 参考 GB/T 5231—2001《加工铜及铜合金化学成分和产品形状》。

1.4 关于电工用铜线锭标准❶

现行的电工用铜线锭国家标准的制定实际上是对电工用铜杆质量的一个倒退，这种标准只能保护落后，以小失大。对电缆工业是一个不适用的淘汰标准。用电工铜线经加热、用老的回线式轧机轧出的黑铜杆，还要进行酸洗。这种生产方式技术经济指标低下，人工、能耗、铜耗都大，而且严重污染环境，铜杆质量低劣、圈重轻(短)，完全不适于现在先进的线缆生产的需要，故在 20 世纪 80 年代早已被电缆工业所淘汰。

2 杂质元素对铜性能的影响

2.1 杂质元素对铜导体电导率（电阻率）的影响

各种杂质元素对铜导体电导率的影响分列于图 3.2-6、图 3.2-7、图 3.2-8 和图 3.2-9。

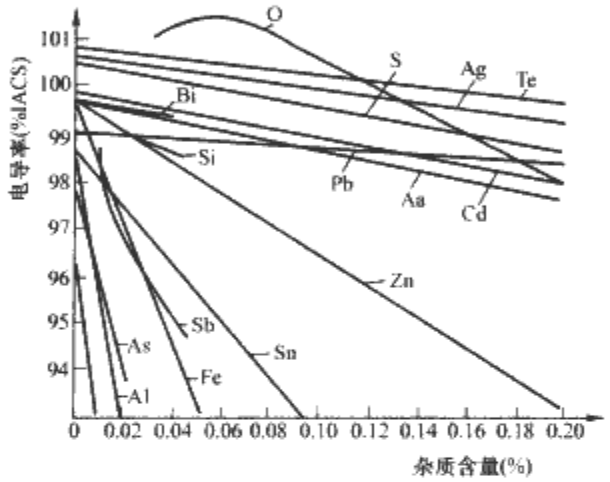


图 3.2-6 各种元素对铜导体电导率的影响

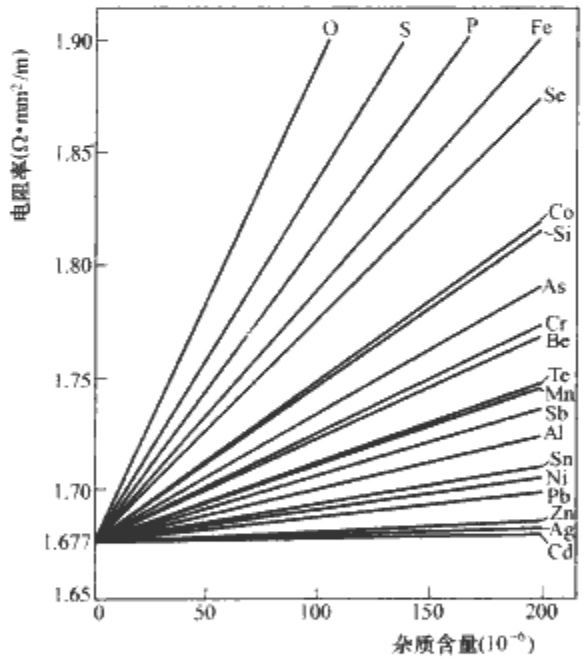


图 3.2-7 各种元素固溶在铜中对铜导体电阻率的影响

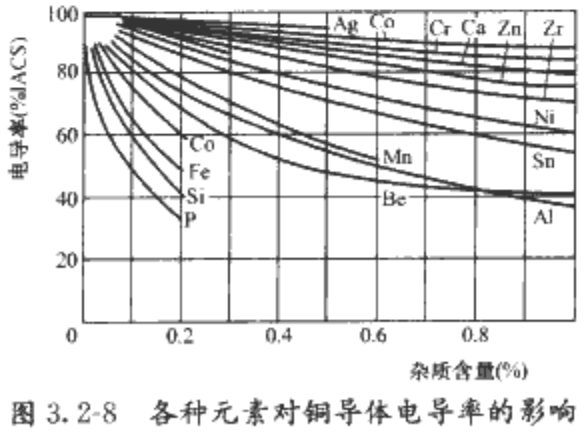


图 3.2-8 各种元素对铜导体电导率的影响

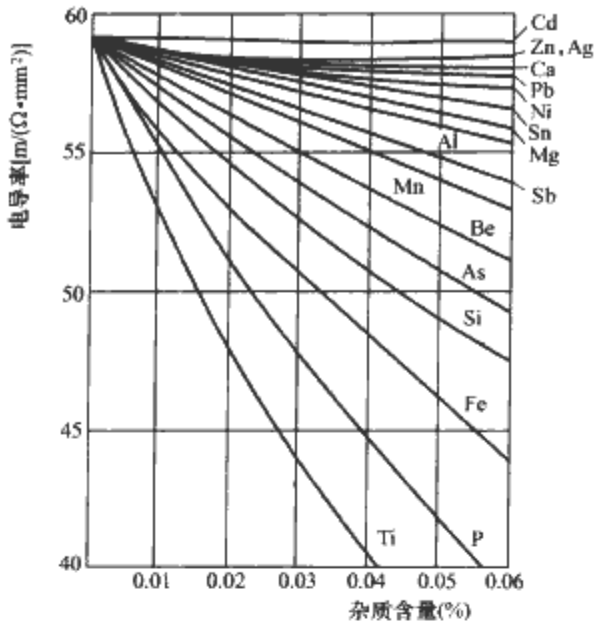


图 3.2-9 各种元素对铜导体电导率的影响

2.2 杂质元素对铜综合性能的影响

杂质元素对铜综合性能的影响如表 3.2-5 所示。任何杂质元素都不同程度地降低铜的电导率和热导率，固溶元素（Cd、Ag 例外）的影响最大，呈第二相析出的元素的影响则较小。各种杂质对铜电导率的影响几乎等于各个元素影响的算术和。铜材的加工和退火等因素对铜制品的电导率和柔软度也有影响。

表 3.2-5 杂质元素对铜导体综合性能的影响

分 类	元 素	组织特性	对铜性能的影响
固溶于铜的杂质元素	铍、镁、钛、锆、铬、锰、铁、钴、镍、钯、铂、银、金、锌、镉、铝、镓、铟、硅、锗、锡、磷、锑、砷等，其中镍、锰、钯、铂、金还与铜无限固溶	α 固溶体	①都不同程度地提高铜的硬度和强度；同时，实际不降低铜的加工塑性。 ②都不同程度地降低铜的导电性和导热性。其中以钛、磷、铁、硅、砷等降低最多，铍、铝、锑、锰、镍等次之，而银、铬、镉、镁、锌、锆等降低较少。降低电导率较少的元素，有的还常用作高强、耐磨、耐热的导电铜材
很少固溶于铜，并与铜形成易熔共晶的杂质元素	铅、铋等	铜加含铅或铋的共晶	铅、铋呈易熔共晶分布在铜的晶界，热压时易开裂；铋还降低铜的室温塑性，使铜“冷脆”。铅、铋对铜的导电、导热性影响不大。铅可改善铜的可切削性
几乎不固溶于铜，并与铜形成熔点较高的脆性化合物的杂质元素	氧、硫、硒、碲等	在铜的晶粒边界含有 Cu_2O 或 Cu_2S 或 Cu_2Se 或 Cu_2Te 等脆性化合物的共晶	降低铜的塑性，硒、碲均提高铜的切削性

❶ 参考 GB/T 468－1997《电工用铜线锭》。

（1）氧的影响——氧几乎不固溶于铜。有氧铜凝固时，氧以（$Cu+Cu_2O$）共晶的形式析出，分布于铜的晶界上。图 3.2-10 为有氧铜和无氧铜的铸态显微组织。氧与其他杂质共存时则影响极为复杂。通常，氧元素对铜的可退火性有着正面的影响（在下文中将有进一步的阐述），它能与较多杂质元素反应，把这些元素从铜固溶体中析出来，阻止了它们对可退火性的影响和减少了它们对导电性的影响程度。氧的存在也能使铜中的氢（来源于阴极铜的有机污染物，铜熔化、铜液输送到达结晶轮前的燃料）与其反应，从而去除铜中所含的氢。所以在韧铜杆（低氧铜杆）生产时一般含氧量控制在$[200(175)\sim400(450)]\times10^{-6}$，而不是含氧量越低越好，目的就是要利用它与阴极铜中的某些有害杂质反应（相平衡），降低有害影响的程度。但对无氧铜杆的生产则不然，因为含氧量大于约 10×10^{-6} 时对导电性能则产生不利的影响，故对无氧铜杆的生产一般含氧约控制在 10×10^{-6} 及以下为好，并且希望使用较纯的阴极铜为佳，以适应生产无氧铜杆工艺的需要。

氧和铜产生的 Cu_2O 可与 Bi、Sb、As 等杂质反应，形成高熔点的球状质点分布于晶粒内，有利于降低晶界脆性。

氧可稍微提高铜的强度，但降低铜的塑性和在冷态下降低疲劳极限。氧亦降低铜的电导率，见表 3.2-6。

氧与铁、氧与砷、氧加锑和氧加砷加锑对铜（700℃退火、30min）性能的影响，见表 3.2-7、表 3.2-8 和表 3.2-9。氧与铋对铜性能的影响，见表 3.2-10。氧与其他杂质对铜电导率的影响，见表 3.2-11。

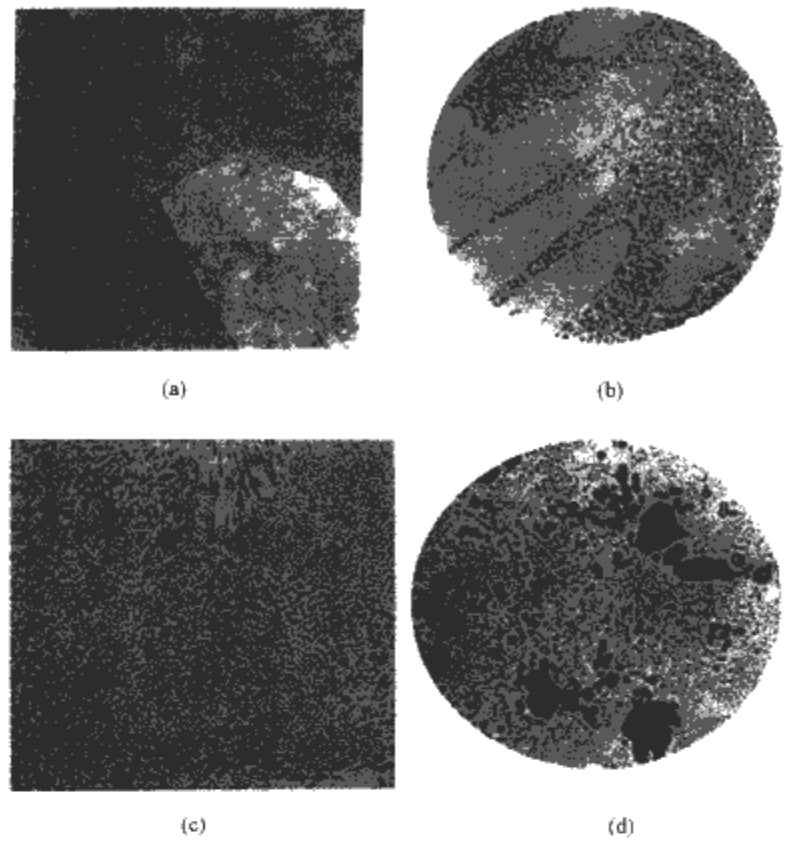


图 3.2-10 有氧铜和无氧铜铸态组织（200 倍）
（a）无氧铜浸蚀后呈现的铜晶粒；（b）含氧 0.15%，亚共晶，未浸蚀（随着氧含量的增加，出现含 Cu_2O 的亚共晶体）；（c）含氧 0.39%，共晶体，未浸蚀；（d）含氧大于 0.39%，过共晶，未浸蚀

表 3.2-6　　氧对铜性能的影响

状　态	氧含量（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	断面缩率（%）	电导率（%IACS）	密度（kg/m³）	疲劳强度 5×10^7 次（MPa）
700℃退火 30min	0.016	228	54	77	101.4	8910	77
	0.040	225	50	72	101.6	8900	94
	0.060	228	56	70	101.5	8900	91
	0.090	232	53	65	100.6	8880	84
	0.170	242	49	57	99.0	8840	77
	0.360	260	55	39	96.2	8760	77
冷拉态	0.036	263	30	73	99.6	—	130
	0.049	263	29	68	98.9	—	123
	0.094	267	27	63	97.9	—	134
	0.220	288	27	49	94.6	—	120

表 3.2-7　　氧与铁对铜（700℃退火、30min）性能的影响

氧含量（%）	铁含量（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	断面缩率（%）	电导率（%IACS）	密度（kg/m³）	疲劳强度 2×10^7 次（MPa）	备　注
0.014	0.06	228	57	73	101	8900	98	氧和铁同时存在而含量在本表所述范围内时，铜的电导率和伸长率均显著降低；但强度和疲劳强度则显著升高
0.003	0.20	225	60	73	54.1	8920	94	
0.004	0.40	235	60	80	42.8	8920	101	
0.008	0.73	263	52	80	40.8	8920	101	
0.005	0.96	253	45	82	38.9	8910	105	
0.004	1.38	302	30	79	37.7	8910	108	
0.007	1.80	312	29	79	37.7	8910	112	
0.008	2.09	348	34	79	37.9	8910	141	

表 3.2-8 氧与砷对铜（700℃退火、30min）性能的影响

氧含量（%）	砷含量（%）	铁含量（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	断面缩率（%）	电导率（%IACS）	密度（kg/m³）	疲劳强度 2×10^7 次（MPa）	备注
0.016	0.053	0.008	221	57	72	85.5	8910	98	
0.005	0.093	痕迹	225	57	70	76.9	8980	101	
0.003	0.36	痕迹	228	60	79	45.3	8920	95	
0.009	0.60	痕迹	235	55	62	33.7	8850	101	
0.013	0.86	痕迹	239	56	66	25.6	8860	105	
0.006	1.04	痕迹	239	59	79	22.5	8910	108	
0.11	0.09	—	—	—	58	73.9	8870	108	
0.039	0.09	—	228	62	70	75.3	8900	95	氧和砷共存，对铜的力学性能无明显影响，但显著降低铜的电导率
0.04	0.24	—	232	57	71	55.1	8890	108	
0.06	0.25	—	228	58	67	54.8	8880	105	
0.07	0.30	—	232	55	66	49.9	8880	105	
0.058	0.34	—	235	56	64	46.4	8880	102	
0.071	0.44	—	232	59	67	40.8	8880	108	
0.034	0.45	—	239	62	72	37.9	8900	112	
0.05	0.93	—	249	61	72	24.0	8900	108	
0.005	0.93	—	—	—	67	19.2	8870	108	
0.006	2.02	—	256	59	64	14.2	8860	120	

表 3.2-9 氧与锑及氧加砷加锑对铜（700℃退火、30min）性能的影响

氧含量（%）	锑含量（%）	砷含量（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	断面缩率（%）	电导率（%IACS）	密度（kg/m³）	疲劳强度 2×10^7 次（MPa）	备注
0.008	0.0035	—	221	63	75	101.0	8910	84	
0.013	0.021	—	225	63	74	97.4	8910	91	
0.005	0.046	—	225	60	72	94.8	8900	91	
0.015	0.092	—	235	49	73	94.1	8920	91	
0.016	0.22	—	232	67	77	75.6	8920	108	氧和锑及氧、锑、砷共存，而含量在本表所述范围内时，对铜的力学性能略有改善；但电导率下降
0.014	0.47	—	235	58	66	56.4	8920	123	
0.014	0.05	0.05	225	60	73	82.5	8900	105	
0.018	0.32	0.045	225	59	71	48.9	8890	105	
0.019	0.51	0.048	232	58	73	38.8	8890	112	
0.018	0.05	0.249	239	59	77	65.9	8910	112	
0.017	0.32	0.244	235	59	75	46.2	8900	112	
0.013	0.55	0.24	239	64	76	32.0	8910	123	
0.018	0.06	0.49	246	60	76	56.0	8890	120	
0.017	0.53	0.5	253	62	76	39.9	8900	123	

表 3.2-10 氧与铋对铜性能的影响

材料状态	氧含量（%）	铋含量（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	断面缩率（%）	电导率（%IACS）	密度（kg/m³）	疲劳强度 2×10^7 次（MPa）	备注
700℃退火 30min	0.015	0.002	225	66	68	101.3	8900	94	氧和铋的含量在本表所述范围内，对铜的导电性很少改变，但伸长率下降，而强度、疲劳强度则升高
	0.016	0.006	232	62	72	101.0	8920	94	
	0.011	0.016	235	60	74	101.0	8910	94	
	0.015	0.015	232	64	73	99.5	8890	105	
冷拉（加工率 50%）	0.015	0.002	369	17	62	99.9	8920	134	
	0.016	0.006	376	17	65	99.8	8920	137	
	0.011	0.016	364	17	60	100.0	8920	137	
	0.015	0.015	364	13	73	98.9	8930	134	

表 3.2-11 氧与其他杂质对铜电导率的影响

杂质		氧含量（%）	铜线电导率（% IACS）	备注
名称	含量（%）			
铁	0.000 07	无	100.0	氧使铁呈 Fe_3O_4 析出，提高铜的电导率
	0.05	无	75.3	
	0.000 07	铜在 850℃氧扩散饱和	102.2	
	0.05	同上	99.9	

续表

杂质		氧含量 (%)	铜线电导率 (% IACS)	备注
名称	含量 (%)			
镍	0.000 7	无	100.3	少量氧不干扰镍对铜电导率的影响
	0.05	无	96.3	
	0.000 7	0.018	100.15	
	0.05	0.017	96.4	
磷	0.000 8	无	99.55	氧可氧化固溶于铜的磷，提高铜的电导率
	0.020	无	88.85	
	0.000 8	铜在850℃氧扩散饱和	100.0	
	0.02	铜在850℃氧扩散饱和	100.2	
锡	0.005	无	99.7	氧与锡生成 SnO_2，使固溶的锡减少，提高铜的电导率
	0.050	无	99.55	
	0.005	0.023	100.15	
	0.050	0.024	100.15	
镉	0.044	无	99.25	
	0.164	无	97.6	
	0.050	0.017	99.75	
	0.168	0.017	98.45	
硫	0.005	无	99.9	硫、硒、碲降低铜的电导率不多，且不受氧的干扰
	0.010	无	99.8	
	0.005	铜在850℃氧扩散饱和	99.8	
	0.010	铜在850℃氧扩散饱和	99.95	
硒	0.005	无	99.6	
	0.05	无	99.3	
	0.005	0.037	99.7	
	0.05	0.035	99.35	
碲	0.005	无	99.9	
	0.05	无	96.65	
	0.005	0.030	99.85	
	0.05	0.025	99.6	
砷	0.000 6	无	99.9	不管氧的存在与否，砷总是严重降低铜的电导率
	0.046 5	无	87.8	
	0.000 5	0.026	99.85	
	0.042	0.029	87.8	
锑	0.019 4	无	96.9	氧能部分地减弱锑对铜电导率的影响
	0.060	无	91.0	
	0.019 4	0.13	97.85	
	0.062	0.028	91.3	

(2) 氢的影响——氢在铜中的溶解度随着温度的升高而增大（见表3.2-12）。氢在固态铜中形成间隙式固溶体，提高铜的硬度。有氧铜在氢气氛中退火时，氢可与铜中的 Cu_2O 反应，产生高压水蒸气，使铜破裂，俗称“氢病”，CO也能使 Cu_2O 中的Cu还原，生成高压 CO_2 使铜破裂，但不像氢那样敏感。

不过，氢病的发生与危害程度和温度有关。在150℃时，因水蒸气处于凝聚状态，不引发氢病，但在400℃氢气中只能停放70h。

表3.2-12 在1个大气压下氢在铜中的溶解度

温度 (℃)	400	500	600	700	800	900
溶解度 [cm^3/(100g Cu)]	0.06	0.16	0.30	0.49	0.72	1.08
温度(℃)	1000	1100	1200	1300	1400	1500
溶解度 [cm^3/(100g Cu)]	1.58	6.3	8.1	10.0	11.8	13.6

(3) 硫的影响——在室温下硫在铜中的溶解度为零，硫在铜中以 Cu_2S 的弥散的质点存在，降低铜的电导率与热导率，但极大地降低铜的塑性，显著改善铜的可切削性能。硫对99.99%铜性能的影响见表3.2-13。

表3.2-13 硫对铜（99.99%铜）性能的影响

材料状态	硫含量 (%)	屈服点 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	电导率 (% IACS)
冷拉铜（加工率36%）	0	356	366	21.4	99.7
	0.15	348	367	14.3	97.8
	0.23	361	369	15.0	97.6
	0.54	369	382	12.1	95.1
	0.78	397	397	7.9	91.6
	0.97	373	398	8.6	90.9
600℃退火，1h	0	610	228	60.0	100
	0.15	570	230	53.6	99.3
	0.23	550	232	51.4	99.6
	0.54	630	236	50.7	96.7
	0.78	77	244	45.7	92.5
	0.97	77	245	45.7	91.4

(4) 硒的影响——铜中的微量硒以 Cu_2Se 化合物形式存在，硒在固态铜中的溶解度极低，对铜的电导率及热导率有影响，但显著降低铜的塑性，并大幅度提高铜的可切削性能，见表3.2-14。

表 3.2-14 硒对铜性能的影响

材料状态	硒含量（%）	屈服点（MPa）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	电导率（% IACS）
冷拉铜（加工率 36%）	0.00	355	366	21.4	99.7
	0.11	360	374	19.9	98.9
	0.26	363	372	15.7	98.0
	0.48	358	376	15.7	97.4
	1.01	351	375	11.4	94.4
	1.44	365	381	10.0	92.0
600℃退火，1h	0.00	61	228	60.0	100
	0.11	59	230	57.1	99.0
	0.26	62	228	55.7	100
	0.48	56	230	52.9	98.8
	1.01	60	234	48.6	95.6
	1.44	71	233	42.1	94.4

（5）碲的影响——碲在固态铜中的溶解度很小，以 Cu_2Te 弥散质点存在，对铜的电导率及热导率有影响，但能显著改善铜的可切削性能，见表 3.2-15。含（0.06%～0.7%）Te 的铜在工业中获得了应用，并在淬火和加工状态下应用，不要回火，以免 Cu_2Te 沿晶界沉淀，使材料变脆。

表 3.2-15 碲对铜性能的影响

材料状态	碲含量（%）	屈服点（MPa）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	电导率（% IACS）
冷拉铜（加工率 36%）	0.00	356	366	21.4	99.7
	0.10	356	373	15.0	99.5
	0.25	362	375	14.3	98.9
	0.45	356	373	11.4	98.2
	1.05	360	374	10.7	97.1
	2.42	359	384	7.1	94.5
600℃退火，1h	0.00	61	228	60.0	100
	0.10	55	230	53.6	99.8
	0.25	55	232	54.3	100
	0.45	57	232	51.4	99.9
	1.05	58	233	41.4	98.0
	2.42	62	234	—	96.1

（6）磷的影响——磷在铜中的最大溶解度（714℃共晶温度时）为 1.75%，室温时几乎为零，显著降低铜的电导率及热导率，但对铜的力学性能与焊接性能有良好的影响。因此，在以磷脱氧的铜中，要求有一定量的残留磷。磷能提高铜熔体的流动性。

直接封装电真空用的无氧铜的含磷量最好不大于 0.0003%，否则，硼化处理氧化膜易剥落，可引起电子管泄漏。磷对在 700℃退火 300min 后的铜性能的影响见表 3.2-16。

表 3.2-16 磷对铜性能的影响

磷含量（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	断面缩率（%）	电导率（% IACS）	密度（kg/m^3）	疲劳强度 2×10^7 次（MPa）
0.014	242	62	73	94.3	8920	77
0.030	225	59	82	78.2	8910	84
0.045	228	50	86	72.4	8920	87
0.096	232	62	80	55.5	8920	99
0.148	239	63	85	45.2	8920	105
0.178	246	61	85	42.5	8900	92
0.254	249	63	84	33.1	8900	94
0.494	270	62	90	19.7	8870	108
0.690	270	63	84	15.5	8860	115
0.790	281	64	81	14.0	8840	123
0.950	281	66	85	11.6	8820	120

（7）砷的影响——在共晶温度时，砷在铜中的溶解度可达 6.77%。少量砷可改善有氧铜的加工性能，对力学性能的影响很小，显著提高铜的再结晶温度，降低铜的导电、导热性能。As 可与铜中的 Cu_2O 起反应形成高熔点的砷酸铜质点，消除了晶界上的 $Cu+Cu_2O$ 共晶体，从而提高了铜的塑性。

（8）锑的影响——在共晶温度 645℃时锑在铜中的溶解量可达 9.5%，并随着温度的下降而急速减少。锑降低铜的抗蚀性、电导率与热导率。锑可与有氧铜中的 Cu_2O 反应形成高熔点的球状质点，分布于晶粒内，可消除晶界上的 $Cu+Cu_2O$ 共晶体，提高铜的塑性。锑对铜性能的影响见表 3.2-17。

表 3.2-17 锑对铜性能的影响

锑含量（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	断面缩率（%）	疲劳强度 2×10^7 次（MPa）	电导率（% IACS）	
					15℃	65℃
0.004	222	62	74	54	—	86.0
0.020	226	61	74	59	97.4	83.4
0.046	225	60	72	58	94.8	81.3
0.092	234	48	78	59	94.1	80.7
0.22	236	—	—	70	75.6	66.6
0.47	234	58	66	78	56.4	51.4

（9）铋的影响——铋在铜中的溶解度可忽略不计，即使在 800℃时的溶解度也只不过 0.01%。铋在 270℃与铜形成共晶体，其中的铋呈薄膜分布于晶界，严重降低铜的加工性能。Bi 对铜的热导率与电导率的影响不大，真空开关触头铜可含（0.7%～1.0%）Bi，因为它有高的电导率，并能防止开关黏结，提高其工作期限，确保运转安全。

（10）铅的影响——铅不固溶于铜，呈黑色质点分布于易熔共晶体中，存在于晶界上。Pb 对铜的电导率与热导率无显著影响，还能大幅度提高铜的可切削性能。约含 1.0% Pb 的铜合金用于加工高速切削零件。Pb 严重降低 Cu 的高温塑性（图 3.2-11），即伸长率 δ 与断面收缩率 ψ 剧烈下降，同时高温脆性区也随着铅含量的增加而扩大。

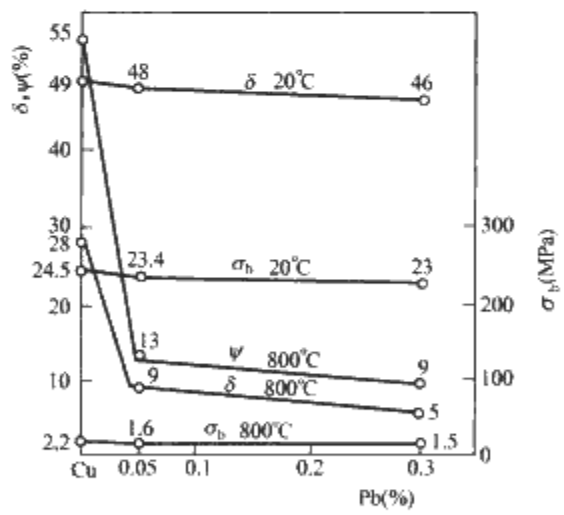


图 3.2-11 铜中的含铅量对高温力学性能的影响

（11）铁的影响——1050℃时，铁在铜中的溶解度可达 3.5%，635℃时的溶解量下降到 0.15%。铁的有益作用是：细化铜晶粒，延迟铜的再结晶过程，提高其强度与硬度。铁也有不利的一面：降低铜的塑性、电导率与热导率。如果铁在铜中呈独立的相，则铜具有铁磁性。在电工仪表中用的无磁性铜线，必须通过反复电解等手段，进一步降低高纯铜中的含铁量达到约 1×10^{-6} 以下的水平。

(12) 银的影响——Cu—Ag组成共晶相图，在共晶温度780℃时，银在铜中的溶解度为7.9%，但室温时的溶解度仅0.1%左右。尽管如此，含0.5%Ag的铜合金在实际生产中仍可能为单一的固溶体。银与可固溶Cu的元素不同，含银量少时，铜的电导率与热导率的下降不多，对塑性的影响也甚微，并显著提高铜的再结晶温度与蠕变强度。因此，含(0.03%～0.25%)Ag的高铜合金成为一类很有实用价值的电工材料，如C11300、C11400、C11500、C11600、C15500等。

(13) 锰的影响——锰可作为铜的脱氧剂，在以锰脱氧的铜中一般含(0.1%～0.3%)Mn，固溶于铜，一方面提高铜的软化温度，另一方面有益于铜的力学性能与工艺性能。

(14) 镍的影响——镍影响铜的导电性，但不明显，除非其含量超过10×10^{-6}。

(15) 稀土元素的影响——稀土元素一般几乎不固溶于铜，少量的稀土金属不管是单个加入（一般以La、Ce、Pr和Y居多），还是以混合稀土金属形式加入都对铜及铜合金的工艺性能、力学性能有益，但对铜电导率的提高到目前为止还未发现有突破性的进展，不像稀土Ce(La)在铝中对电导率有明显的效果。稀土有细化晶粒的效果，使上引法无氧铜杆的结晶组织从柱状晶转化为等轴晶。并且又因它具有造渣、净化铜液的能力，从而可改善上引法铜杆连铸时的工艺性能，特别在原材料铜品位比较低的情况下，可减少热裂、断杆的出现。稀土在铜中可使铜的再结晶温度提高100℃以上，从而提高铜制品的耐高温强度，可起到银铜的类似效果(如镧铜)，但对制品的加工要比银铜困难得多。稀土有脱氧、脱硫的作用，有利于改善氧和硫在铜中的有害影响。在铜中加入0.1%铈可提高制品的伸长率和抗拉强度。添加稀土（如Y）可改善铜和铜合金的抗氧化能力，这是因为含稀土的铜和铜合金氧化皮生成的活化能较一般铜和铜合金氧化皮生成的活化能大。在铜中添加（0.1%～0.6%）铈或钇，据试验表明对导电性能的影响很小。在铜和铜合金熔体中加入过量的稀土，将降低铜的流动性，断面上可能会发现分散的缩孔，而且表面也会变得不光洁，其原因是稀土有很强的化学活性，高温下极易氧化，生成稀土氧化物，这种氧化物熔点高，密度大（如Ce_2O_3熔点1690℃，密度6.86g/cm³），不容易排除，残留在熔体中就成所谓的“黏渣”现象。总之，稀土过量加入，再加加入方法不当是造成“黏渣”的原因。稀土多加不好，太少没有作用，要根据具体情况适量而为之。在加入稀土时通常要考虑烧损、净化和合金化作用量，一般加入0.001%～0.3%。向铜中加入0.008%混合稀土即可显著改善铜的工艺性能；加入小于0.1%Y时，铜的力学性能与工艺性能就有改善；含(0.01%～0.15%)La的铜合金的力学性能、电导率、抗软化温度均可与Cu-0.15Ag的银铜合金相媲美。

3 铜的性能

3.1 物理性能（见表3.2-18）

表3.2-18 电工用铜的物理性能

名 称	数 值	名 称	数 值
相对原子质量	63.64	晶格常数 (10^{-10}m)	3.6147
结 晶	面心立方	密度（0℃） (g/cm³)	8.93

续表

名 称	数 值	名 称	数 值
熔点 (℃)	1083	电导率(20℃) (%IACS)	软:100～102 硬:96～98
线膨胀系数（20℃） (10^{-6}℃$^{-1}$)	17	抗拉强度 (N/mm²)	软:195以上 硬:345以上
热传导率（20℃） [W/(m·K)]	394	弹性模数 (kN/mm²)	136.5
体积电阻率(20℃) ($10^5\Omega$·cm)	1.673	质量磁化率 (10^{-6})	−0.086
电阻温度系数(20℃) (℃$^{-1}$)	0.0043	比热容（20℃） [J/(kg·K)]	384.9

3.2 力学性能（见表3.2-19）

表3.2-19 纯铜一般典型的力学性能

性 能	加工铜	退火铜	铸造铜
弹性极限σ_e（MPa）	280～300	20～50	—
屈服点σ_s（MPa）	340～350	50～70	—
抗拉强度σ_b（MPa）	370～420	220～240	170
伸长率δ（%）	4～6	45～50	—
断面收缩率ψ（%）	35～45	65～75	—
布氏硬度（HBS）	1100～1300	350～450	400
剪切强度σ_τ（MPa）	210	150	—
冲击韧性α_k（J）	—	16～18	—
抗压强度σ_y（MPa）	—	—	1570
镦粗率（%）	—	—	65

3.3 化学性能

Cu与大气、水等接触时，反应生成难溶于水的碱性硫酸铜$CuSO_4\cdot3Cu(OH)_2$和碱性碳酸铜$CuCO_3\cdot Cu(OH)_2$薄膜，又称为铜绿。这层薄膜与铜基体结合牢固，本身致密，能防止铜继续腐蚀。因此，铜在大气、纯净淡水、流速慢的海水中都具有很强的抗蚀性，在这些介质中使用时，可不加保护。

Cu的正电位相当高，Cu^+及Cu^{2+}的标准电极电位分别为0.522V及0.345V。因此，Cu在水溶液中不能置换氢，在非氧化性酸（如盐酸等）、碱液、盐溶液、某些有机酸（醋酸、柠檬酸、脂肪酸、乳酸、草酸等）和非氧化性的有机化合物中，均有强的抗腐蚀性能。不过，铜的钝化能力低，氧、各种氧化剂及其他氧化性酸、通以氧或空气的酸、盐溶液等，都会使铜发生氧去极化腐蚀。铜表面的碱性化合物也可与氧发生反应，最初生成一价铜盐，而后氧化成二价铜盐，转为Cu^{2+}，进入溶液，使铜腐蚀。氨、氯化铵、氰化物、汞盐的水溶液、湿的卤素等都能猛烈地腐蚀铜。

铜及铜合金在不同介质中的腐蚀情况见表3.2-20。可是介质是否流动、流速大小、是否含杂质及其量等，均对铜的腐蚀速度有影响或强烈影响。

3.4 磁性能

纯铜为逆磁性物质，室温磁化率为-0.085×10^{-6}，温度对其磁化率的影响不大。铁磁性杂质特别是铁若在铜中呈不溶状态，则使铜显铁磁性。

表 3.2-20 纯铜在各种介质中的腐蚀情况

续表

介质	腐蚀情况
乙醛 CH_3CHO	◎
乙醇 C_2H_5OH	◎
硫酸钡 $BaSO_4$	◎
汽油，苯 C_6H_6	◎
烷基胺 RNH_2	○
氯化铝 $AlCl_3$	○
氢氧化铝 $Al(OH)_3$	◎
硫酸铝 $Al_2(SO_4)_3$	○
甲酸 HCOOH	○
潮湿的氨 NH_3	×
干燥的氨 NH_3	◎
氯化铵 NH_4Cl	×
氢氧化铵 NH_4OH	×
硝酸铵 NH_4NO_3	×
硫酸铵 $(NH_4)_2SO_4$	△
苯胺($C_6H_5NH_2$)和苯胺染料	△
矿物沥青	◎
乙醚 $C_2H_5OC_2H_5$	◎
气氛：工业气氛	◎
大陆气氛	◎
海洋气氛	◎
乙二醇 CH_2OHCH_2OH	◎
丙酮 CH_3COCH_3	◎
乙炔 C_2H_2	×
氯化钡 $BaCl_2$	○
氢氧化钡 $Ba(OH)_2$	◎
碳酸钡 $BaCO_3$	◎
二氯化铁	○
三氯化铁	×
硫酸亚铁	○
硫酸铁 $Fe_2(SO_4)_3$	×
天然气	◎
苯甲酸 C_6H_5COOH	◎
啤酒	◎
潮湿的氢氰酸 HCN	×
干燥的氢氰酸	◎
潮湿的漂白粉	○
硼砂 $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	◎
硼酸 H_3BO_3	◎
潮湿的溴	○
干燥的溴	◎
氢溴酸 HBr	△
丁烷 C_4H_{10}	◎
硫酸氢钙 $Ca(HSO_4)_2$	○
氯化钙 $Ca(OH)_2$	○
氢氧化钙 $Ca(OH)_2$	◎
次氯酸钙 $Ca(ClO)_2$	○
石碳酸 C_6H_5OH	△

介质	腐蚀情况
氯醋酸 $CH_2Cl \cdot COOH$	○
潮湿的氯	△
干燥的氯	◎
干燥的三氯甲烷 $CHCl_3$	◎
铬酸 $H_2C_2O_4$	×
柠檬酸	◎
潮湿的二氧化碳	◎
干燥的二氧化碳	◎
碳氢化合物	◎
松香	◎
漆	◎
乙酸乙酯 $CH_3COOOC_2H_5$	◎
醋	◎
无水氢氟酸 HF	○
含水氢氟酸	△
甲醛	◎
明胶，动物胶	◎
丹柠酸	◎
葡萄糖	◎
甘油	◎
碳酸钾 K_2CO_3	◎
氯化钾 KCl	○
氰化钾 KCN	×
氢氧化钾 KOH	○
硫酸钾 K_2SO_4	◎
生石灰 CaO	◎
碳酸钙 $CaCO_3$	×
酮	◎
氯化铜 $CuCl_2$	△
硝酸铜 $Cu(NO_3)_2$	△
硫酸铜 $CuSO_4$	○
硫酸镍	△
油酸 $CH_3(CH_2)_7CH:\ CH(CH_2)_7COOH$	○
棉子油	◎
轻油	◎
亚麻油	○
锂化合物	○
氯化镁 $MgCl_2$	○
氢氧化镁 $Mg(OH)_2$	◎
硫酸镁 $MgSO_4$	◎
乳胶	◎
乳酸 $CH_3 \cdot CH(OH) \cdot COOH$	◎
重铬酸钠 Na_2CrO_7	×
碳酸氢钠 $NaHCO_3$	◎
硫酸氢钠 $NaHSO_4$	○
碳酸钠 Na_2CO_3	◎
氯化钠 NaCl	○

续表

介　　质	腐蚀情况
铬酸钠 Na_2CrO_4	◎
氰化钠 NaCN	×
氢氧化钠 NaOH	○
次氯酸钠 NaClO	○
硝酸钠 $NaNO_3$	○
过氧化钠 Na_2O_2	△
磷酸钠	◎
硫酸钠和硅酸钠	◎
硫化钠和硫代硫酸钠	×
氯化镍 $NiCl_2$	△
40%及小于40%的硫酸	○
40%～80%的硫酸	△
80%～95%的硫酸	○
潮湿的硫化氢 H_2S	×
干燥的硫化氢	◎
重油	◎
草酸 HO_2CCO_2H	◎
石腊	◎
石油	◎
磷酸	○
苦味酸，黄色炸药	×
丙烷 $CH_3CH_2CH_3$	◎
汞或汞盐	×
硝酸 HNO_3	×
盐酸 HCl	△
盐水	○
氧	◎
肥皂溶液	◎
银盐	×
潮湿的二氯化硫 SCl_2	×
干燥的二氯化硫	◎
熔化的硫	×
纯硫	○
潮湿的二氧化硫	○
干燥的二氧化硫	◎
干燥的三氧化硫	◎
糖浆，蜜	◎
甜菜汁	◎
氯化锌 $ZnCl_2$	○
硫酸锌 $ZnSO_4$	◎
亚硫酸 H_2SO_3	○
硬脂酸 $CH_3(CH_2)_{16}CO_2H$	◎
松节油	◎
潮湿的四氯化碳 CCl_4	○
干燥的四氯化碳	◎
甲苯 $CH_3C_6H_5$	◎
氧化铝 Al_2O_3	◎

续表

介　　质	腐蚀情况
潮湿的三氯乙烯	○
干燥的三氯乙烯	◎
三氯乙酸 Cl_3CCO_2H	○
污水	◎
冷凝水	◎
酸性矿井水	△
海水	○
饮用水	◎
水蒸气	◎
水煤气	○
酒石酸	◎
氢	◎
10%的过氧化氢 H_2O_2	○
大于10%的过氧化氢	×

注 ◎—耐腐蚀，完全可用；
○—轻度腐蚀，可用；
△—腐蚀较○略重；
×—剧烈腐蚀，不可用。

4 电工用铜杆生产

电工用铜分为韧铜和无氧铜两类，其制品按用途主要有杆材、线材、型材、带材和编织制品五种。对铜杆而言，可分为韧铜杆和无氧铜杆两种。韧铜杆又可分为低氧铜杆(也称光亮铜杆)和黑铜杆两种，对黑铜杆的生产，由于其技术、经济效果差，污染严重，早在20世纪80年代被我国电缆工业所淘汰。

生产低氧铜杆的方法，目前全世界都采用连铸连轧法生产，其中具有代表性的连续生产线有："Contirod"法生产线、SCR法生产线和"Properzi"法生产线三种，在20世纪80年代我国电缆工业和冶金工业的有关公司，都先后引进了这些生产线，并相继引进了具有较大生产能力的机组(如10万t/年、15万t/年、22万t/年和25万t/年的机组)，以满足市场的需要，提高铜杆质量和技术经济效果。目前我国也生产类似生产线的装备，但年产能力都比较小，一般都在5万t/年左右，到10万t/年以下，且相对而言生产线自动化水平都比较低。

生产无氧铜杆有连铸法和连续浸涂法两种，其中具有代表性的连续生产线有：Outokumpu公司的Upcast®连铸生产线、Rautomead公司的连铸生产线和GE公司的连续浸涂生产线，但目前全世界主要用前两种生产线生产。这些生产线我国自20世纪80年代开始就已引进，对于上引法生产线，我国上海电缆研究所首先进行了自主开发和产业化，取得了很好的技术经济效果，只是机组年产能力较小，一般只在2000～6000t/年。目前连铸法无氧铜杆的生产能力正在向年产2万吨级及以上的方向发展。

铜导体生产的质量链是很长的，从阴铜开始直至铜导体的各种制品，但质量优劣的中心是在铜杆，而且生产铜杆(特别连铸连轧法)的工艺性又特别强，对铜杆质量的影响很显著。

低氧铜杆和无氧铜杆在应用的数量和质量上是旗鼓相当，各有特点和优势。

近年来，低氧铜杆和无氧铜杆生产过程的自动化和过程

监测设备的应用都有助于工艺工程师和生产操作者。也正因为低氧铜和无氧铜各有特点与优势，为了有效地改善和提高制品的质量，许多“跨越”式发展正在进行：例如在连铸连轧生产线上拟浇铸无氧铜级别的铜，使两者合二为一；为了缩短从采矿—冶炼—铜杆生产的流程，正在开发用铜浓缩矿获得枝晶铜生产无氧铜杆的新技术，或者用类似的技术获得铜粉生产无氧铜杆；为了扩大废铜在无氧铜杆生产中的直接应用，已取得了一些可用的结果，但还需深化研发、扩大应用。

4.1 低氧（韧）铜杆和无氧铜杆的区别

低氧铜杆和无氧铜杆由于制造方法不同，具有各自的特点，制线厂要根据不同的用途择优而用，以取得最大的技术经济效果。

4.1.1 关于氧的吸入和脱去以及它的存在状态

生产铜杆的阴极铜的含氧量一般在$(10\sim50)\times10^{-6}$，由相图可知，在常温下氧在铜中的固溶度约为2×10^{-6}。低氧铜杆的含氧量一般在$[200(175)\sim400(450)]\times10^{-6}$，因此氧的进入是在铜的液态下吸入的，而上引法无氧铜杆则相反，氧在液态铜下保持相当时间后，被还原而脱去，通常这种杆的含氧量都在$(10\sim5)\times10^{-6}$以下，最低可达$(1\sim2)\times10^{-6}$，从组织上看，低氧铜中的氧，以氧化铜状态，存在于晶粒边界附近［见图 3.2-12（b)］，这对低氧铜杆而言可以说是常见的但对无氧铜杆则很少见。氧化铜以夹杂形式在晶界出现对材料的韧性产生负面影响。而无氧铜中的氧很低，所以这种铜的组织是均匀的单相组织［见图 3.2-12(a)］，对韧性有利。在无氧铜杆中的多孔性是不常见的，而在低氧铜杆中则是常见的一种缺陷。

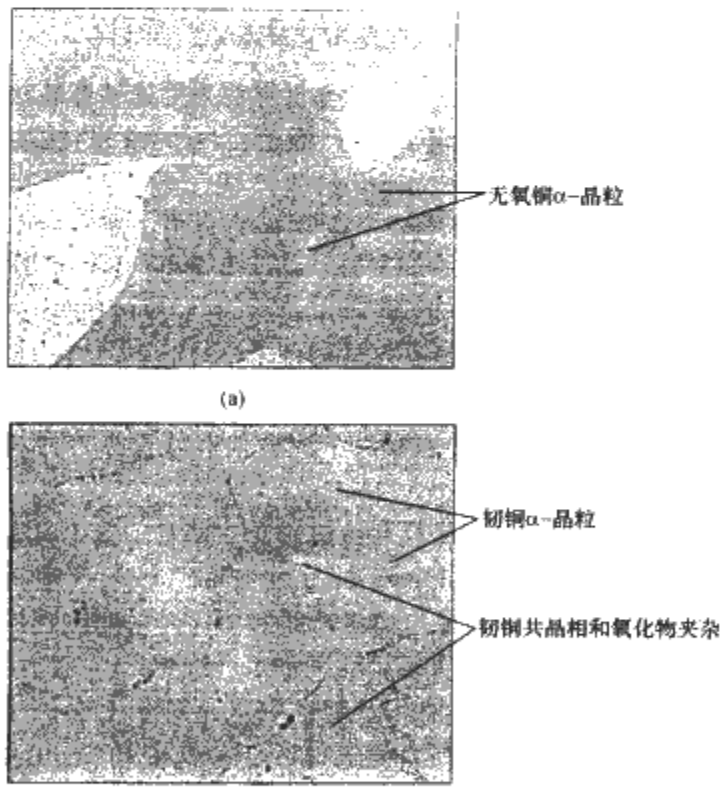


图 3.2-12 低氧韧铜和无氧铜的铸造组织
（a）无氧铜；（b）低氧韧铜

4.1.2 热轧组织与铸造组织的差别

低氧铜杆由于经过热轧，所以其组织属热加工组织，原来的铸造组织已经破碎，在 8mm 的杆时已有再结晶的形式出现；而无氧铜杆属铸造组织，晶粒粗大，这就是无氧铜的再结晶温度较高，需要较高退火温度的固有原因。这是因为，再结晶发生在晶粒边界附近，无氧铜杆组织晶粒粗大，晶粒尺寸甚至能达几毫米，因而晶粒边界少，即使通过拉制变形，但晶粒边界相对低氧铜杆还是较少，所以需要较高的退火功率。对无氧铜成功的退火要求是：由杆经拉制，但尚为铸造组织的线时的第一次退火，其退火功率应比同样情况的低氧铜高 10%～15%。经继续拉制，在以后阶段的退火功率只需比低氧铜的高 2%～3%。需请退火设备设计、制造者和导线生产者注意，对设备的安装功率应留有足够的余量及对低氧铜和无氧铜切实区别执行不同的退火工艺，以保证在制品和成品导线的柔软性。

4.1.3 夹杂、氧含量波动、表面氧化物和可能存在的热轧缺陷的差别

无氧铜杆的可拉性在所有线径里与低氧铜杆相比都是优越的，除上述组织原因外，无氧铜杆夹杂少、含氧量稳定、无热轧可能产生的缺陷、杆表氧化物厚度$\leqslant15\times10^{-10}$ m。表 3.2-21 为 Al—CO 拉线厂的拉制断线数据，可以说明两种杆可拉性的差别。在连铸连轧生产过程中如果工艺不稳定，对氧监控不严，含氧量不稳定将直接影响杆的性能。如果杆的表面氧化物能在后工序的连续清洗中得以弥补外，但比较麻烦的是有相当多的氧化物存在于“皮下”，对拉线断线影响更直接，故而在拉制微细线、超微细线时，为了减少断线，有时要对铜杆采取不得已的办法——剥皮，甚至二次剥皮，目的要除去皮下氧化物。

表 3.2-21 Al—CO 拉线厂的拉制断线数据

线 径	φ8.0mm 上引法无氧铜杆	φ8.0mm 低氧铜杆（ETP）
大拉和中拉线径（≥0.45mm）	无断头	约 9～10t/断头
细拉线径（0.10～0.12mm）	680～880kg/断头	480～580kg/断头
多头细拉线径（0.10～0.12mm）	3300～4000kg/断头	2000～2200kg/断头

4.1.4 低氧铜杆和无氧铜杆的韧性有差别

两者都可拉到 0.015mm 的线，但在低温超导线中的低温级无氧铜，其细丝间的间距只有 0.001mm，见图 3.2-13。

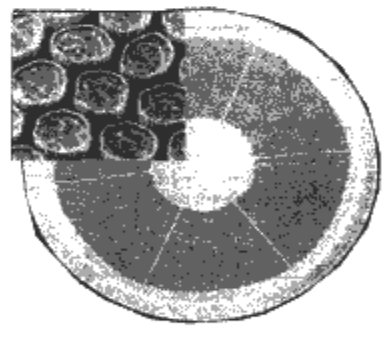


图 3.2-13 铌—钛多股细丝复合超导线

4.1.5 从制杆的原材料到制线的经济性有差别

制造无氧铜杆要求质量较高的原材料。一般，拉制直径大于 1mm 的铜线时，低氧铜杆的优点比较明显，而无氧铜杆显得更为优越的是拉制直径小于 0.5mm 的铜线。

4.1.6 低氧铜杆的制线工艺应与无氧铜杆的有所不同

低氧铜杆的制线工艺不能照搬到无氧铜杆的制线工艺上来，至少两者的退火工艺是不同的。因为线的柔软性深受材料成分和制杆、制线和退火工艺的影响，不能简单地比较低氧铜和无氧铜的软硬。

在几十年以前，在当时的技术水平下有人曾说由于无氧铜的再结晶温度比低氧铜高，所以无氧铜不适于生产漆包

线。现在看来这种笼统的说法是不全面的。事实证明无氧铜不仅在漆包线中应用，而且像漆包线那样的电子用细铜线生产中［拉线机多根出线—镀锡—绞（束）线一条龙连续生产］也用得很好。

4.2 低氧（韧）铜杆生产

生产低氧（韧）铜杆的生产线，目前具有代表性的为Contirod生产线（见图3.2-14）、SCR生产线（见图3.2-15）和Properzi生产线，前两者可能在铜杆的质量上更具优势。

低氧（韧）铜杆生产的Contirod法、SCR法和Properzi生产线，粗看生产流程差不多，但各有特点，从中也可反映出杆质量不同的某些信息，表3.2-22示出了它们的主要特点。

连铸连轧生产线总的技术方向是要提高可轧性。可轧性与原材料成分有关，上面已有阐述，不再重复，与连铸连轧直接相关的是要控制氢、氧、夹杂（内在和外来）和杆的表面质量。连铸连轧的质量中心是浇铸。

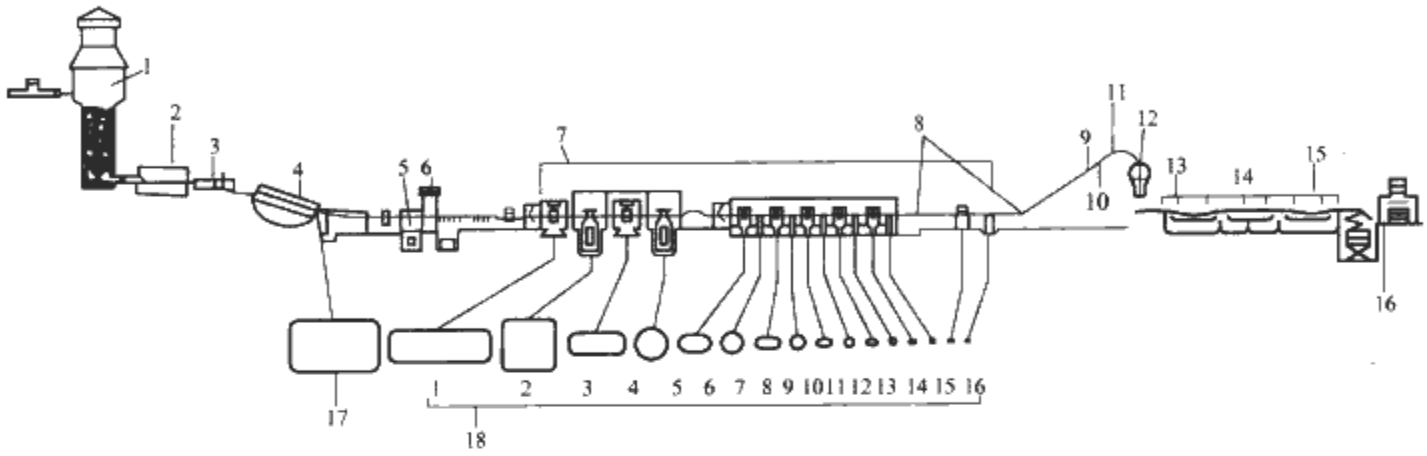


图3.2-14 Contirod生产线示意图

1—监炉；2—保温炉；3—测氧（OXYCELL）；4—连铸机；5—修边机；6—剪刀；7—16机架轧机；8—冷却管；9—缺陷监测（涡流探伤）；10—铁夹杂监测（磁性探性）；11—直径控制；12—成圈机；13—硫酸清洗；14—水洗；15—在线上蜡；16—成圈杆、捆扎；17—铸条；18—道次断面

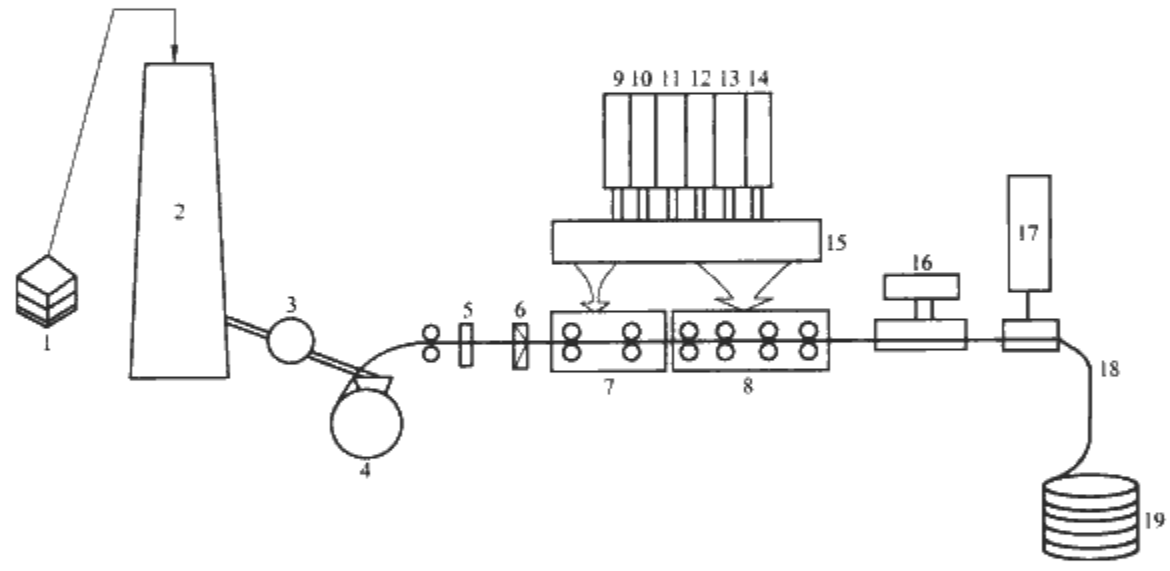


图3.2-15 SCR生产线示意图

1—电解铜板；2—竖炉；3—保温炉；4—浇铸机；5—旋转剪；6—削边机；7—粗轧机；8—精轧机；9—乳化油；10—消泡剂；11—杀菌机；12—清洁剂；13—还原剂；14—酒精；15—乳化油系统；16—无酸清洗系统；17—水蜡喷涂；18—夹送辊；19—收杆

表3.2-22 Contirod、SCR和Properzi生产线装备特点

方　法	特　点
Cortirod	(1) 竖炉熔化或感应炉熔化，感应炉熔化便于温度控制和管理，撇渣和过滤（见图3.2-16） (2) Hazelett式铸机（见图3.2-17），铸机倾斜15°，有利于防止铸条（坯）开裂 (3) Krupp轧机，16机架，中间引出轧件，可制造一定规格范围的型材 (4) 涡流探伤和磁性探伤，在线监测表面缺陷和外来的铁夹杂 (5) 在线硫酸清洗和水洗，清洗效果更好
SCR	(1) 竖炉熔化 (2) SCR式五轮铸机（见图3.2-17） (3) 摩根式悬臂无扭转平立辊轧机，轧机润滑乳化系统开坯和精轧均为单独，对乳液的过滤和轧件质量都有利 (4) 无酸（酒精）清洗 (5) 在线探伤
Properzi	(1) 竖炉熔化或感应炉熔化，感应炉熔化便于温度控制和管理 (2) 两轮钢带式铸机（见图3.2-17），铸机引出有一定的扭转，对防止铸条开裂无积极的作用，虹吸管式浇铸（见图3.2-18）

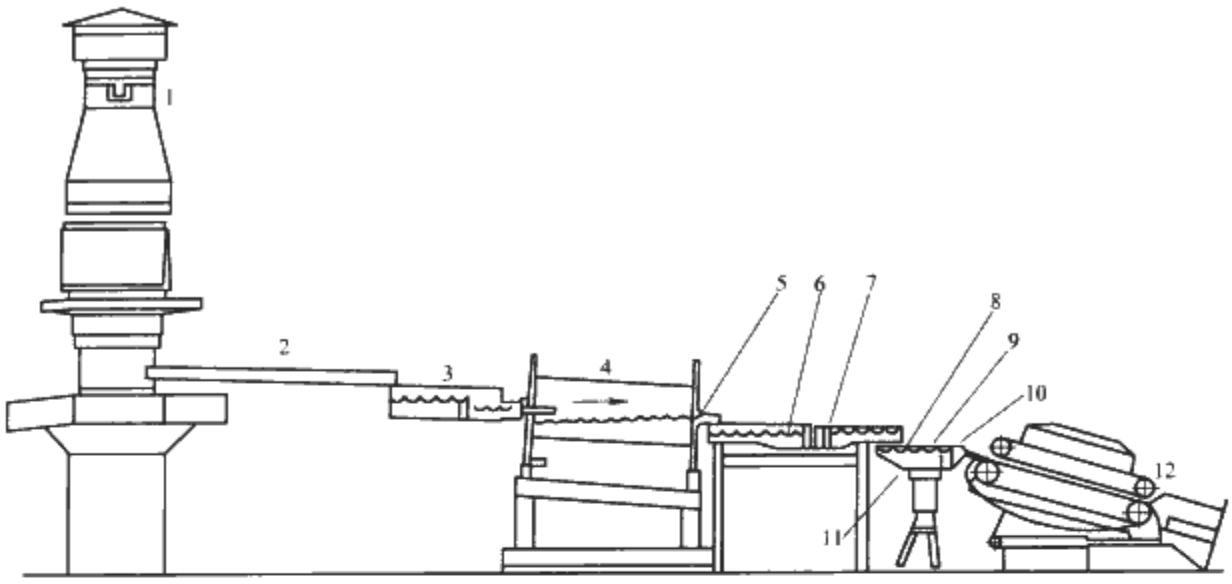
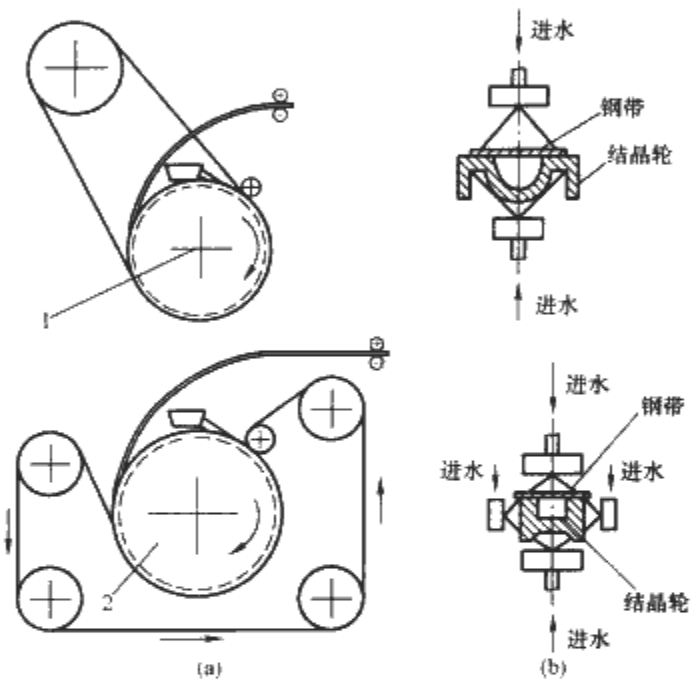


图 3.2-16 在阿尔卡特（Alcatel rod mill）厂使用的撇渣和过滤措施

1—Asarco 竖炉；2—流槽；3—撇渣匣；4—保温炉；5—下注；6—坝；7—过滤器；8—下注；9—过滤器；10—坝；11—浇包；12—铸机



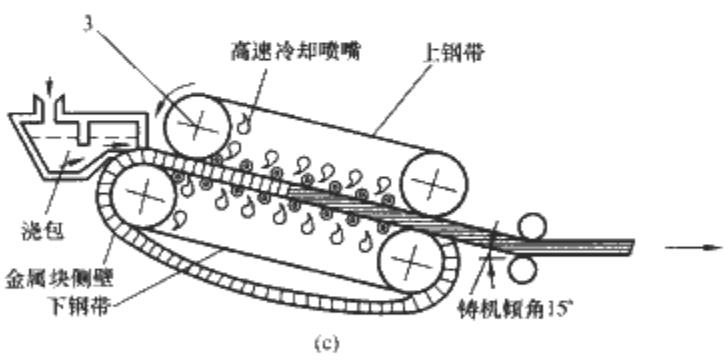


图 3.2-17 各种连铸机型式

(a) Properzi 两轮式铸机；(b) SCR 五轮式铸机；(c) Hazellet 双带式铸机

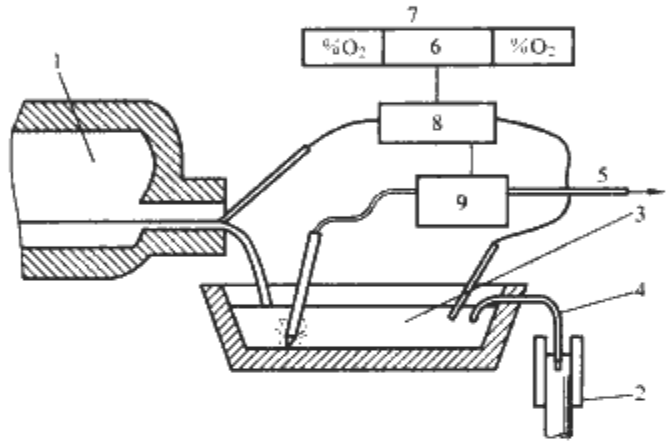


图 3.2-18 Properzi（Essex Group，Inc.）虹吸管式浇铸

1—保温炉；2—铸模（结晶器）；3—浇包；4—虹吸管；5—压缩气流；6—气流；7—显示器；8—控制回路；9—气流控制

4.2.1 竖炉熔化

竖炉熔化包括浇铸以前的铜液输送系统。在竖炉内的还原气氛必须严格控制，一般不超过 1.5×10^{-6}，如果按氧的平衡计算应带有氧 $(150\sim400)\times10^{-6}$。如铜液中有过度的氢进入铸条将会产生铸条的多孔性。按阴极铜的质量，如果氧的总量不匹配和不控制，那么缺陷将会在铸条中产生。如果氧太低，将允许可引起“热脆性”的杂质引起晶间开裂，如果氧太高将在凝固时产生有害的多孔性。为了控制氧已采取诸如竖炉分析、严格规定操作规程、用氧枪注氧、保证燃烧器操作规范、在保温炉插木还源和熔体覆盖（木炭、石黑）等措施。例如在 SCR 生产线上已装备了燃气混合器、CO 红外分析仪和自动空气燃气比例控制系统（ARC 系统），用于自动控制竖炉和流槽系统等所有燃烧区的空气燃气比，能精确控制每个烧嘴中燃烧气体的混合比，达到控制铜液中的氧含量。在 Contirod 生产线上（见图 3.2-16）安装了撇渣匣，撇渣匣可达到将熔体表面上的浮渣撇去和用氧枪加氧的目的；在铜液输送过程中采用二道过滤，可最好地除去由竖炉和流槽中带入的耐材料碎粒等夹杂物。在竖炉中典型的硫消耗为 5×10^{-6}，如用高硫燃料，硫污染将成为一个问题，致使在下道工序中引起“热脆性”。

由于油价不断上升，每吨铜杆的成本增加，因此提高竖炉的热效率、降低成本，在经济上显得非常重要。Encore wire Ltd 公司已设法改变操作、改变竖炉设计和使用气旋（旋风）燃烧器，以提高竖炉的热效率看来是成功的，其主要的道理和措施（见图 3.2-19），主要有增加气旋燃烧器，在炉子中部去循环流动的气体，有助于减少流动气体的通道；增加阴极铜加入的定位，控制排位；改变燃烧速率；图 3.2-19 中 B 排有效高的燃烧速率；用热电偶监测，确定炉子中炉衬与流动气体的温度；收集有关数据，如每小时校正气体流动的温度和压力、铜含氧量、浇包温度和生产率；用理论和实际的结果进行模拟比较，比较实际的效果。根据试验证明：通过炉子中部流动气体的强制流动，热交换能改

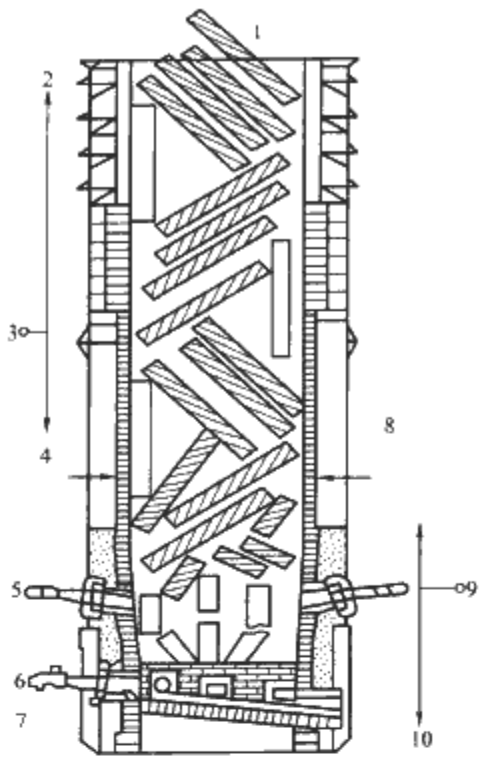


图 3.2-19 铜竖炉熔化

1—阴极铜；2—炉口；3—炉子烟道（烟囱）；4—气旋燃器；5—B排；6—A排；7—炉床；8—炉子中部；9—燃烧器区；10—放出孔区

善，实际上延长了流动气体的路径，相当于增加了炉子的高度，它亦关闭了垂直的炉气通道（这样路径短），呈现出更多的能量在炉子的中部。炉子的能效可提高10%，仅7.6m的“Encore炉”，它的能效可与12.2m的标准竖炉相比。由于明显增加短炉的能效，归根结底炉子可以达到热效率大于80%，可与感应炉的能耗相竞争，也可以与熔化铜的其他炉子相竞争。

4.2.2 浇铸

在铜杆生产中，浇铸是质量之母。铜的成分和均匀性在熔化和浇铸中就被确定了。由凝固引起的缺陷，在进一步的加工中是不能消除的。浇铸包括上游铜液的供给、凝固和铸条从铸机送出。铸条质量的优劣受到许多因素的影响。

（1）温度控制——供给铸机熔体温度的稳定性是一个重要因素，它决定了连铸稳定状态的稳定性。温度变化直接导致冷却变化。竖炉的特点之一是能实现快速熔化，但也会引起熔体温度和流量的明显变化。

（2）浇包和浇嘴的设计—— 一般浇包约容纳3t铜，有大的表面和深度。Properzi公司采用高铬铜的虹吸管将铜液从大的浇包送向铸机（见图3.2-18）。在整个系统中浇包是金属熔体最后的容器，也是需要除气、夹杂上浮将熔体送入铸模前的最后准备阶段。如果平均铸速为30t/h，在一个浇包中的驻留时间将是6min，如果用一个小浇包，浇铸速度大于60t/h，则驻留时间减少到了小于1min，由此整个速度就增加了。

（3）氧化物夹杂——在浇包中采用陶瓷过滤（见图3.2-16）可以避免夹杂进入铸模。然而在浇包和浇嘴中会形成铜氧物夹杂（CuO和Cu_2O）的粒子，它们可进入铸模而导致后工序的可拉性问题，因为它们一旦形成就不溶在铜基体中，当拉线时也不变形，会引起断线或表面缺陷。这就是Properzi公司采用虹吸管的原因，借此可达到抗氧化的作用，再加上采用大而深的浇包可使铜液驻留时间长、热损失少。

（4）铸模（结晶器）——连铸连轧采用钢带、Cu—Cr—Zr合金铸轮和坝块链。这里存在脱模涂层的污染问题，SCR用乙炔煤烟的涂层，要注意乙炔煤烟的发生。Contirod用硅油涂带子，用石墨悬浮物涂坝块链。

（5）冷却液的污染——连铸连轧冷却液与浇铸表面直接接触是可能的，由此可能将悬浮的固体带向了浇铸表面，所以要采用过滤措施和专用的冷却液系统，以消除冷却液的污染。

（6）多孔性——连铸连轧铸条的多孔性是常见的一种缺陷。宏观的多孔性可影响铸条的可轧性。可溶性气体在凝固时释放，形成气泡（这是因为凝固时固溶度急剧下降的原因）和过厚的脱模涂层等都会引起宏观的多孔性。某些杂质与氧反应也可自液体释放气体和形成化合物，例如硫和氧反应形成二氧化硫气体，可形成微小的多孔性，而且这些微小的孔都聚集在晶粒边界上。

（7）晶粒组织和氧化物分布的均匀性——连铸连轧铸条最典型的晶粒组织是柱状组织，虽然理论上要形成希望的等轴晶组织是可能的，但实际上仍然是难以捉摸的。在模子表面上的晶核，产生细的晶粒，而后这种晶粒成长形成柱状晶，从模壁指向铸条的中心。柱状晶组织在连轧过程中有时间进行再结晶，特别是产能大的轧机，随着面积压缩率超过90%时，在晶粒边界上氧化物被轧碎，并变细分散在整个杆的截面上。图3.2-20示出了Properzi热轧典型的晶粒细化。

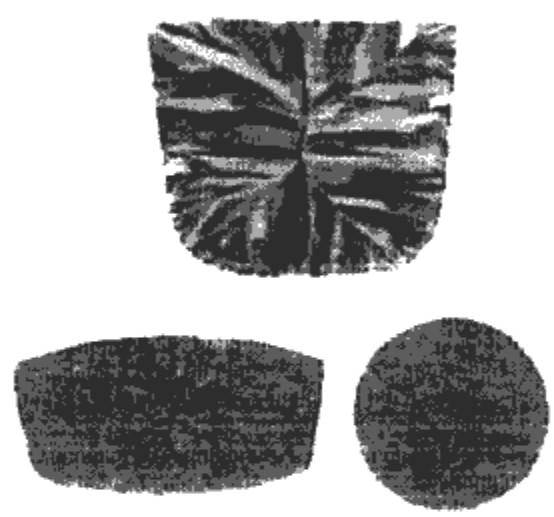


图 3.2-20 Properzi热轧典型的晶粒细化

4.2.3 连轧和铜杆的在线清洗

对低氧铜杆的夹杂和表面问题，之所以受到制杆厂和制线厂的关注，主要是因为它会直接影响杆的可拉性，特别对漆包线生产厂还很重视线的表面质量。生产实践中，尤其在微细和超微细线生产中断线的主要原因是外来的耐火材料夹杂和铁夹杂，与线材表面质量密切相关的是铜杆表面氧化膜的厚度。外来的铁夹杂主要来自连轧系统，而氧化膜的厚度则与铜杆清洗效果有关。

（1）铁夹杂——细小的铁粒子来自轧辊磨损和与热铸条相接触的钢工具。在热应力和机械应力作用下，工具钢的表面引起开裂，当开裂扩展时，小钢粒掉下埋入轧件中。这些小钢粒可用在线磁性探伤仪发现。为了减少铁夹杂，采用的措施有：换掉钢部件，用耐磨的铜辊道或陶瓷轮（氧化锆或Si_3N_4），这些材料比较贵，但寿命可提高20倍；用改进的H—13钢做轧辊，提高辊子寿命，从而减少夹杂；增加轧制道次，降低轧制压缩率，减少对轧辊做功、改善导向和乳化液的质量（见表3.2-23）；增加乳化液的流量（即增加对轧辊的冷却），并对乳化液用真空过滤器进行过滤。通过这些措施可使轧辊寿命增加，尤其粗轧机轧辊的寿命可提高100%。例如：Contirod生产线的Krupp轧机系统把轧机机架增加后，从而允许断面压缩率得以重新分配，使每个粗轧机架的断面减缩率由50%降到35%；SCR生产线乳化液较为理想的配比范围如表3.2-23所示。

表 3.2-23 连轧乳化液的配比

乳 化 液	粗 轧	精 轧
可溶性油	5.5%～6.0%体积	6.0%～6.5%体积
酒 精	0.5%体积	1.0%～1.5%体积

注 控制项目：pH 值、可溶性油的浓度、在溶液中的铜含量和控制细菌数。

(2) 铜杆在线表面清洗——铜杆的在线表面清洗，有两种：Contirod 生产线的硫酸液清洗法和 SCR、Properzi 生产线的无酸（酒精还原）清洗法。用酒精还原工艺简单，对生态无害。当酒精与赤热的氧化铜表面相互作用时，使氧化铜还原，其反应式为

$$CuO + H-\underset{H}{\overset{H}{C}}-\underset{H}{\overset{H}{C}}-OH \longrightarrow C_2H_4O + H_2O + Cu$$

图 3.2-21 示出了 CuO 还原程度与水中酒精的浓度和氧化铜温度的关系。根据图 3.2-21 可以看出：在温度为 650～880℃热轧时，酒精的浓度应≤5%。经验证明，轧机乳化液中酒精的含量为 3%～4%，能保证光亮铜杆表面质量良好。硫酸液清洗与酒精液清洗相似，似乎前者效果更好。例如 Contirod 法清洗最终铜杆表面残留的氧化膜厚度可小于 150×10^{-10}m，而 SCR 法清洗只达 250×10^{-10}m。

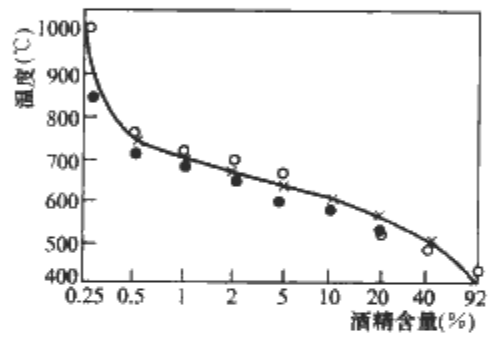


图 3.2-21 CuO 还原程度与水中酒精的浓度和氧化铜温度的相互关系

○—全部还原；×—部分还原；·—无反应

(3) 表面粉末——在轧制和拉线过程中都会呈现粉末，这些粉末来自铜的氧化物，在轧制时它埋在铜的表面上，故需用高压喷枪系统在每个机架进入处清理轧件的表面，喷枪的工作压力达 13.6MPa。喷枪不仅清除轧件上的氧化皮，而且亦可除去轧出的小碎片和其他小的表面缺陷。

4.3 无氧铜杆生产

4.3.1 无氧铜杆生产方法的特点

无氧铜杆的生产目前主要有上铸法和浸涂法两种，而上铸法由于主导技术的不同又分 Outokumpu upcast 上引法和 Rautomead 法（见图 3.2-22）两种，特点如表 3.2-24 所示。

表 3.2-24 各种无氧铜制杆法的特点

方 法	特 点
Outokumpu upcast 上引法	采用熔沟式感应炉熔铜，炉子用高铝砖封砌，这是潜在的夹杂的来源。熔沟设计熔化炉和浇铸炉分开。对较大的生产能力，使用熔化炉和保温炉配置方式，此时熔体直接送到保温炉的加料区。熔沟亦用高铝质耐火材料衬砌。在感应器熔沟中由高速度引起的侵蚀，通过在开始热调试时由湿润表面的高密度烧结（熔结）得以补偿。整个系统流动的速度是低的，使潜在的侵蚀剧烈地降低，飘浮的粒子不会进入结晶器。由于氧化铜和氧化亚铜几乎很少存在，所以使在耐火材料中含有硅的晶间腐蚀的危险可减到最少，而这是粒子产生的潜在来源
Outokumpu upcast 上引法	本方法因使用感应炉加热，由于在涡流的作用下，所以熔体在炉内是不停地运动的，因此在合金制作时，添加元素的成分比较均匀，但对添加易挥发元素如 Mg 等的铜合金，如不采取适当措施，合金元素的消耗可能会增加或较不易控制
Rautomead 上铸法	典型的 Rautomead 结构用的是整体式纯石墨坩埚的简接电阻加热（见图 3.2-22）。坩埚与附加的石墨层一起，起到牺牲的作用，以消耗加入的阴极铜中的氧（石墨本身相对于铜是很惰性的），但这个过程是非常慢的，然而为了除氧又是必要的。由流动引起的侵蚀问题，对这种方法，其可能性是极其低的。正因为这种方法在炉内的熔体与感应加热相比，相对地比较“静置”，所以对加入易挥发合金元素的铜合金的制作，对成分控制相对有利，如再加适当措施将更好。 近些年来，“Rautomead”公司与“INDUGA”合作，已开发了大容量的铸机系统，这系统把 Rautomead 的铸造技术汇集进了感应炉加热，使其具有了大容量和熔体的驻留时间长达 2h 的特点
浸涂法	这种方法与古老的蜡烛制造工艺相似。浸涂成型是利用冷铜杆吸热的能，用一根铜芯杆（也称种子杆）垂直通过一个坩埚的底部，坩埚中盛可控制液位的铜熔体，使熔体与移动的芯杆熔合在一起，并逐渐凝固结合成较粗的连铸无氧铜杆，然后经热连轧、涡流探伤检验，制成适合拉线尺寸的半成品线杆。半成品线杆经拉线，其中产量的 1/3 作为这一过程再生产用的母杆（或称循环杆），产量的 2/3 则成为供下工序进一步拉线用的成品线杆。这个方法的前半程就是无氧铜杆生产的连铸连轧法。它与低氧铜杆生产的不同之处就在于：在炉内充入的保护气下脱氧、连铸成粗的圆形无氧铜杆坯［而不是铸条（坯）］，由粗的杆坯连轧成要求尺寸的半成品杆，供粒种子杆和成品线用

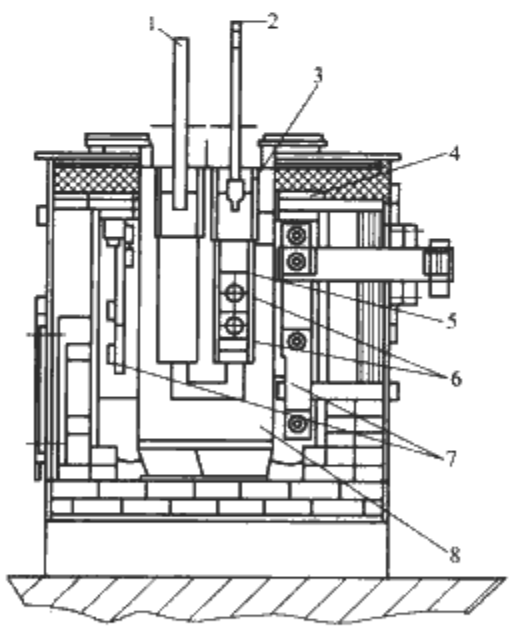


图 3.2-22 Rautomead 铸机截面图

1—阴极铜原料；2—结晶器；3—鳞片状石墨覆盖层；4—坩埚上部碳化硅；5—隔板；6—石墨环密封座；7—高密度石墨加热器；8—石墨坩埚

上述三种方法，阴极铜在炉内都需一个脱氧的过程。导体用的无氧铜杆和无氧铜合金杆，一般不用磷脱氧，因为看来加磷不多，但明显影响铜导体的电导率，所以只有在特殊情况下，在不明显降低电导率，尚能使电导率达到产品要求

的条件下，才加入微量的磷，以改善熔体浇铸时的流动性。

无氧铜生产的冶金化学反应，在不同阶段和对不同制杆方法是有所不同的。

（1）阴极铜予处理阶段。阴极铜加入熔化炉前，如在预热炉预热（700℃左右），此时铜板表面存在的胆矾和碱式碳酸铜及水分发生离解和蒸发，其反应式如下

$$CuSO_4 \cdot 5H_2O \longrightarrow CuO + SO_2\uparrow + H_2O\uparrow$$

$$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2 \xrightarrow{250\sim270℃} CuCO_3 + CuO + H_2O\uparrow$$

$$CuCO_3 \xrightarrow{560\sim600℃} CuO + CO_2\uparrow$$

$$H_2O(液) \longrightarrow H_2O(汽)\uparrow$$

（2）阴极铜加入炉内熔化。对浸涂法，铜板加入工频感应熔化炉内，熔体在电磁感应作用下不断运动，铜液中杂质元素间及与碳层和保护氮气中的氢元素之间（一般木炭覆盖层厚100～150mm；炉内充入含有2%氢的氮气）会发生一系列化学反应，如

$$4CuO \xrightarrow{1025℃} 2Cu_2O + O_2\uparrow$$

$$4Cu + O_2 = 2Cu_2O$$

$$Cu_2O + Me \rightleftharpoons MeO（造渣） + 2Cu（Me—金属杂质）$$

$$2Cu_2O + Cu_2S = 6Cu + SO_2\uparrow$$

$$Cu_2O + H_2 = 2Cu + H_2O\uparrow$$

$$Cu_2S + H_2 \rightleftharpoons 2Cu + H_2S\uparrow$$

$$2Cu_2O + C = 4Cu + CO_2\uparrow$$

$$SO_2 + C = S + CO_2\uparrow$$

$$2MeO + C = 2Me + CO_2\uparrow$$

由这些反应可以看出：可明显地降低铜中的氧和硫。

对Outokumpu upcast法，就不存在炉内充入含有2%氢的氮气保护，主要由木炭或鳞片状石墨脱氧；对Rautomead法，主要由木炭或鳞片状石墨和石墨坩埚的石墨牺牲层脱氧，因而化学反应相对简单，三种方法生产的无氧铜，它们的含氧水平都可达10×10^{-6}及以下，浸涂法无氧铜杆的含氧量甚至可低达$(2\sim5)\times10^{-6}$。

4.3.2 无氧铜的特性和应用

无氧铜具有良好的韧性、热加工和冷加工性能，适于拉细线、微细线、超微细线；制品在氢气中使用，加热不会产生氢脆；导电和导热性能优良，纯度达99.99%的无氧铜导体，其电导率≥101% IACS；焊接性能良好；由于氧化膜不会剥离，同玻璃的封着性好；无氧铜中磷、砷、锌及硫等杂质含量少，在高真空中几乎没有挥发等特性。

（1）物理性能和工艺性能。无氧铜的物理性能，见表3.2-25。无氧铜经冷加工后加工率即便达到84%，而其电导率还有99% IACS（见图3.2-23）。

表3.2-25 无氧铜的物理性能

项 目	数 据
熔点（℃）	1083
退火后电导率（% IACS）	101
20℃热导率[4.185J/(cm·s·℃)]	0.934
热膨胀系数℃$^{-1}$：20～100℃ 20～200℃ 20～300℃	17.0×10^{-6} 17.3×10^{-6} 17.7×10^{-6}
热容量（4.185J/℃），20℃	0.092
密 度（g/cm^3），20℃	8.94
弹性模数（MPa）	120 000

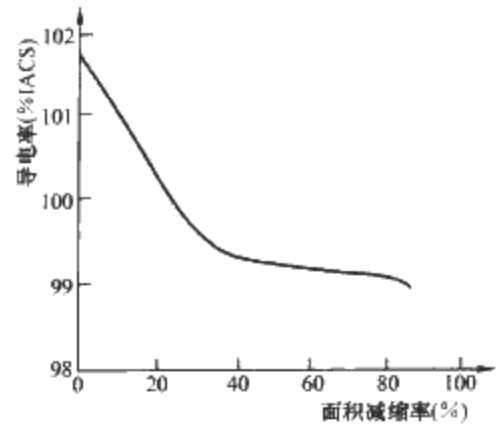


图3.2-23 冷拉对无氧铜电导率的影响

（2）力学性能。无氧铜的拉伸特性如表3.2-26所示。

退火后无氧铜的低温应力—应变曲线见图3.2-24，即使在低温下也不出现脆性。无氧铜的软化特性与银含量的关系，见图3.2-25。无氧铜的高温拉伸性能，见图3.2-26。无氧铜的疲劳强度列于表3.2-26，疲劳试验曲线见图3.2-27，无氧铜的疲劳强度比韧铜（C1100）高，在10^8疲劳次数下的疲劳强度为80～100MPa，在低温下疲劳试验曲线，见图3.2-28，在低温下疲劳强度增加。

表3.2-26 无氧铜的拉伸特性

形状和尺寸	热处理	抗拉强度（MPa）	屈服强度0.2%（MPa）	伸长率（%）	疲劳强度，10^8次（MPa）
扁 材	退火	240	80	45	80
	半硬	300	250	1.4	90
	硬	350	320	6	90
	弹性	390	350	4	100
2.0mm线材	退火	250	—	35	—
	硬	300	—	1.5	—
	弹性	460	—	1.5	—

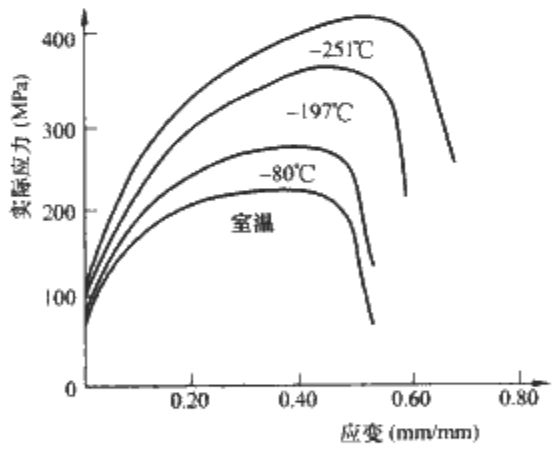


图3.2-24 退火后无氧铜的低温应力—应变曲线

（3）其他特性。

1）氢脆——如将含氧量为$(250\sim500)\times10^{-6}$的韧铜，在含氢的还原性气氛中加热到较高的温度，氢向铜中扩散，与氧反应形成水蒸气使铜脆化。但无氧铜由于含氧极少，在保护性气氛中加热不会产生氢脆，图3.2-29示出了无氧铜在70MPa压力下于空气和氢气中暴露30min后测定的应力—应变曲线。

2）氧化膜——无氧铜的氧化膜生成速度与韧铜大致相同，但无氧铜氧化膜的密实性比韧铜的好，经氧化膜剥离试验表明，不产生剥离，因此适用于对玻璃的封着。

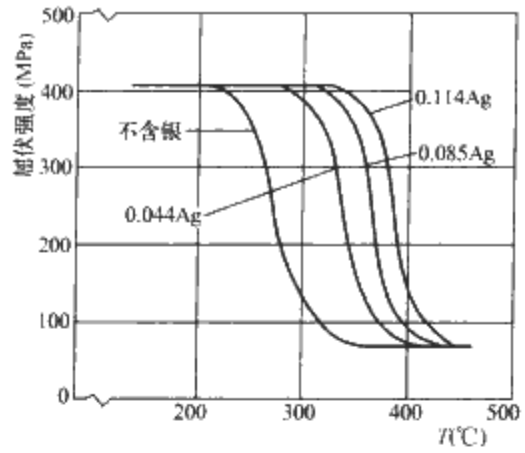


图 3.2-25 无氧铜退火特性与银含量的关系
(冷加工率 90%的 2mm 线材,
在所示温度下退火 30min)

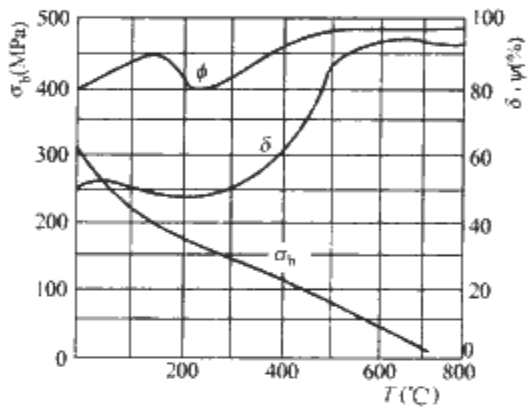


图 3.2-26 无氧铜的高温拉伸性能

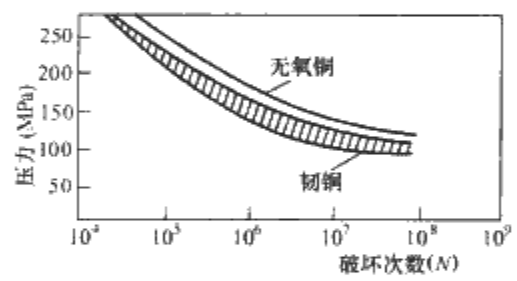


图 3.2-27 无氧铜和韧铜的疲劳强度
(冷加工率 70%)

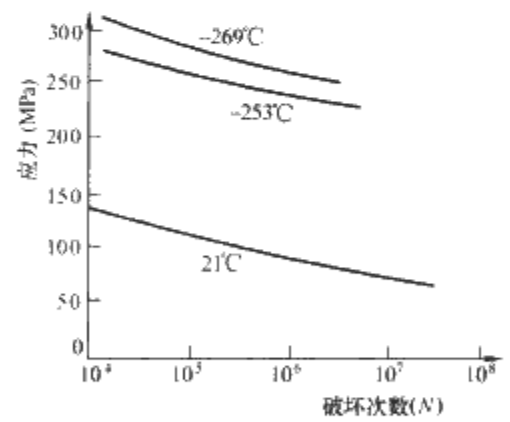


图 3.2-28 退火后无氧铜的
低温疲劳强度

3) 焊接性——由于无氧铜不含氧化亚铜，纯度又高，因此焊接、钎焊等结合性好，焊接处的可靠性高。韧铜因含有氧化亚铜，材料加工后氧化亚铜分布均匀，在焊接时，当铜在凝固时，粗大的氧化亚铜主要集中在晶界上，因此焊接强度差。另外，在钎焊、锡焊预热时，在氢气保护气氛中加热，由于无氧铜含氧极少，不产生脆化。

(4) 无氧铜的分级和用途。根据国家标准(加工铜化学成分和产品形状 GB/T 5231—2001)规定(见表 3.2-3)，无氧铜分为三个级，即零号无氧铜(TU0)、一号无氧铜(TU1)和二号无氧铜(TU2)；在美国 ASTM B 170 标准中将无氧铜分两个级，即普通级无氧铜和电子级无氧铜。随着超导材料及其应用的发展，又发展了低温级无氧铜，用于低温和高温超导线(带)中的稳定保护材料(见图 3.2-13)。无氧铜的级别、区别和主要用途见表 3.2-27。

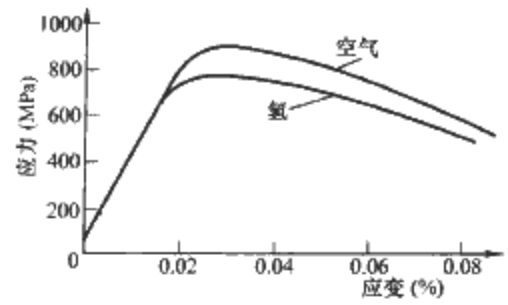


图 3.2-29 无氧铜在 70MPa 压力下于空气和
氢气中暴露 30min 后测定的应力—应变曲线

表 3.2-27 无氧铜的级别、区别和主要用途

级 别	区 别	主 要 用 途
Cu—OF 无氧铜	含铜不小于 99.95%	1. 导体用线材，特别适于拉制要求很高的细线（拉线多根出线）、微细线和超微细线 2. 型材（母线、梯排等）和空心导线（用于大容量发电机的绕组） 3. 超导线材或带 4. 电子方面——同轴电缆；计算机用线；汽车用线缆；电子管元件，如阳极、散热片、连结件、玻璃和金属密封件；二极管用散热器，整流管和其他元件；断流器引出线、组件等；微波设备；印刷线路、雷达元件；不焊接的连接件；波导管 5. 航空、航天用仪器元件、火箭发射屏；氧气切割枪喷嘴；超导磁体元件；电真空断路器、开关和密封垫等 6. 信号传输电缆、音频电缆和音响线缆等
	含氧不大于 10×10^{-6}	
	氢脆：符合 ASTM 试验 B577，1～4 级	
Cu—OFE 电子级无氧铜	含铜不小于 99.99%	
	含氧不大于 5×10^{-6}	
	氢脆：符合 ASTM 试验 B577，1～2 级	
Cu—OFC 低温级无氧铜	化学成分无严格要求，但要求残余电阻比(RRR)，通常采用纯度为 5N 或 6N 铜（99.999%和 99.9999%），含氧量不大于 1×10^{-6}	

4.3.3 上引（铸）法无氧铜杆生产

上引法不仅可制造铜杆，直径从 ϕ8.0～ϕ30.0mm。ϕ8mm 杆主要用作线材，大直径杆主要用作轮轨高速铁路、城市轨道交通用的接触网导线和电镀用的磷铜球，而且也可制造铜排、铜异形材、带材和管材。该法的特点是既可做纯铜，亦可生产铜合金，占地面积小、投资少，可自产自用，按销定产，易于自控产品质量。上引法的工艺流程如图 3.2-30 所示。

(1) 上引法的原理、设备组成和无氧铜杆的性能范围。

1) 原理——上引法连续铸杆是用结晶器（见图 3.2-31）心管下部形成真空度（80～100mm 汞柱），在石墨模孔内外产生压力差，使铜液沿石墨模孔内上升，产生液位差，与引杆端部的引锭头接触，该处铜液迅速冷却结晶成固相。随着牵引轮提升引杆，热交换不断进行，铜液不断由液相转变为固相，成为大长度铜杆，此部位为第一次冷却。随着铜杆的上引，进入紫铜芯管，因杆、管气隙很小(约 0.5mm)，使铜杆的热量进一步被紫铜管外循环冷却水带走，铜杆温度再次下降，这为第二次冷却。在正常情况下，上引出结晶器的无氧铜杆的温度约 50～60℃，表面光亮、氧化膜极薄。

2) 主要设备组成——上引（铸）组机主要由熔化炉、保温炉、结晶器、牵引机构、液位跟踪和成圈机组成。产能

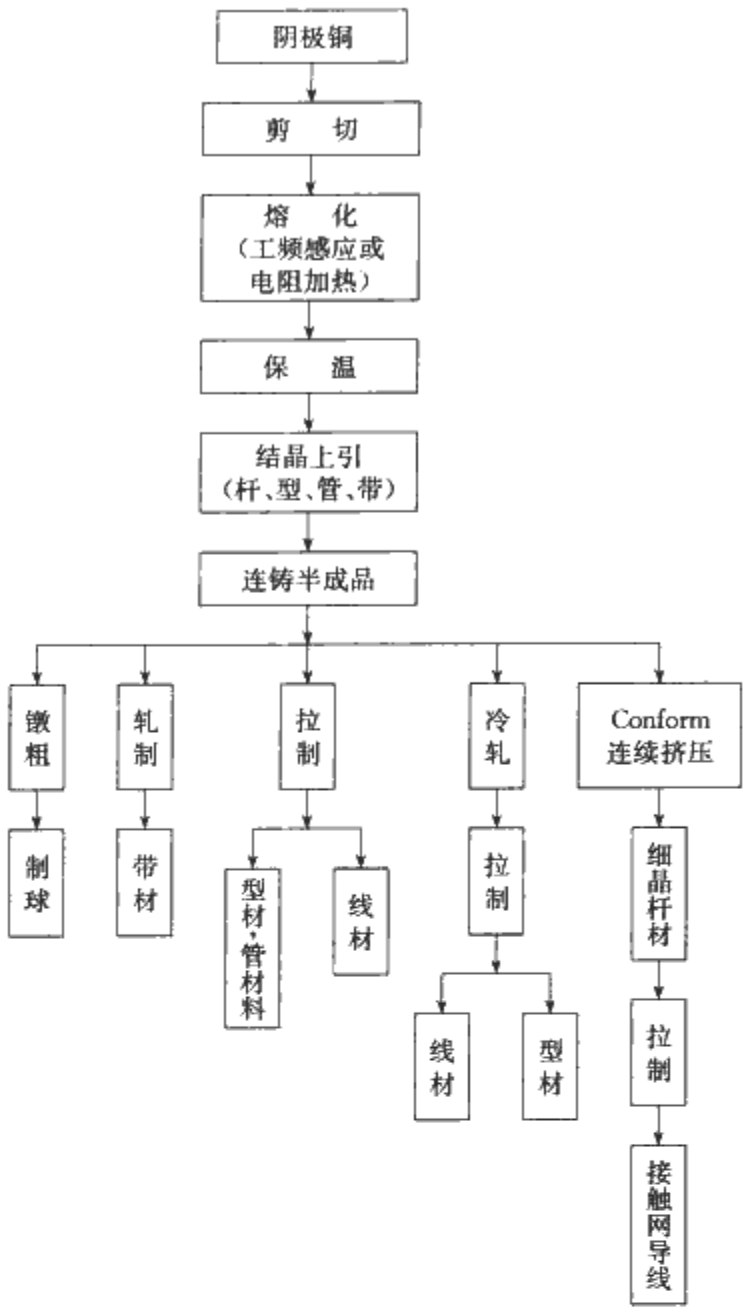


图 3.2-30 上引（铸）法生产工艺流程

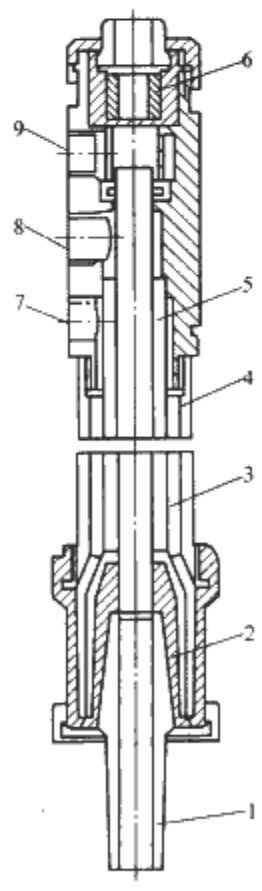


图 3.2-31 结晶器结构示意图

1—石黑模；2—紫铜套；3—冷却水隔管；4—黄铜外套管；5—紫铜芯管；6—密封装置；7、8—冷却水接头；9—真空接头

大的机组熔化炉与保温分开，铜液经流槽供给保温炉（如2万吨级20头上引机组），产能比较小的采用联体炉（熔化炉与保温炉），熔化区的铜液经下部直接供给保温区；结晶器为铜液结晶热交换的主体，应具有高导热、高强度和较大热惯性（即有一定金属体积量，以补偿因个别参数变化而对连铸杆产生较大影响），与石墨模有较大面积接触，装卸方便；牵引机构为保持间歇式停—引—停—引反复进行；液位跟踪为保持保温炉内熔体液位不变，使石墨模插入铜水深度保持稳定不变，以保证石墨模内结晶区状态稳定；成圈（或成盘）机用以收绕铜杆，供下工序使用。

3）无氧铜杆的性能范围。上引（铸）法无氧铜杆属铸态组织，与低氧铜杆的热轧组织是不同的，所以性能也不同。表3.2-28示出了上引（铸）法无氧铜杆大致的性能范围。连铸速度与结晶器的效率有关，以 ϕ8.0mm上引（铸）杆为例，如果结晶器冷却效率高，则连铸速度可达3～4m/min。

表 3.2-28 上引（铸）法无氧铜杆的性能范围

直 径 (mm)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	电导率 (% IACS)	上引连铸速度 (m/min)
8.0	>170	>35	≥101	2.5～3.0
14.4	>170	>35	≥101	0.7～1.0
20.0	>170	>35	≥101	0.6～0.9

（2）上引（铸）法无氧铜杆工艺因素对质量的影响。上引法无氧铜杆的制杆工艺应是比较成熟的，如果将上引（铸）法装备的硬件与软件、结晶器效率和节能效果获得进一步的提高，那就更具突出的技术经济效果。

1）选择合适的阴极铜至关重要——原材料的纯度对工艺过程和制品的质量有明显的影响，一般需要的阴极铜纯度为99.95%、99.97%和99.99%。阴极铜表面的电解液残留物和铜粒（铜瘤）都是污染的来源，应洗净和除去，并烘干水分。

2）结晶器的设计、装备和使用直接影响效率和杆的质量——结晶器的质量直接影响铸杆表面的光亮度和开裂状况。对结晶器的要求应注意：结晶器底端装石墨模螺纹部位制作要规范，装上石墨模后螺纹顶端不存在问题；结晶器内壁管与装石墨模螺纹的紫铜件焊接要保证垂直，内壁管壁厚约为2mm为好，内壁管内孔尺寸必须与石墨模内孔尺寸一致；内壁管的上部长短尺寸要适中，密封压盖间隙要予以保留，如果空气进入结晶器内部会引起铸杆表面氧化，达不到预期的光亮程度。

3）控制炉温是引好铸杆的关键——有不少工厂使用连体式工频感应炉，其中有二体炉和三体炉之分。把熔化炉和引杆保温炉连在一起形成一个整体炉，其优点是每次加铜下炉熔化时铜液面没有起伏，对结晶器威胁不大。但连体炉也有缺点，那就是保温炉中铜液温度因熔化炉加铜而引起变化。多数操作工靠均匀地在熔化炉内加入阴极铜，以调节炉温，这样的铜液温差还较大，约在15～20℃之间，使铜杆质量不稳定。有时因温度过高时造成铸杆空芯，而有时因温度过低造成铸杆突然断杆，这样既影响质量、又影响产量。如果使用带有二氧化硅等材料，按特定尺寸加工的保护套管的WRN型热电偶（带有相应的补偿导线KX）和XCT型测温代表，这样可使温度误差减少，达0.5～2℃。熔体铸杆温度低，例如1100℃，但实际操作上有相当难度，故一般约控制在1140℃±10℃，当然温度越低、温差越小，就

越好。

4）调节水压及出水量是引好铸杆的前提条件——铜液温度，进、出水温差（一般在 15℃左右）和引杆速度是互相相关的。在生产中往往铜液温度和引杆速度是不变的（一般控制在最快的速度下，与熔化炉熔铜速度保持平衡即可），实际上操作工可调的就是水压和出水量。因此，要用灵活的手段去调节，应按不同季节、不同的进水温度来调节水压和排水量（不能光看进、出水温差在 15℃左右就可），并要经常检查铜杆表面及温度是否正常。

5）铸杆冷轧有利于改善铜杆的内在质量——在线缆用的圆铜线生产中，为了降低成本，使用 ϕ8.0mm 铸杆直接拉线，线的质量也好。冷轧有改善组织的细化作用，有利于改善杆的内在质量。如果冷轧总加工率小，细化组织难于达到整个断面，要消除已存在于铸杆内部的缺陷也是不可能的。

（3）改进的上引法连铸机及其铸杆拉线效果的验证。

1）降低炉子能耗——上引法用工频有芯感应炉，包括熔化炉及保温炉（组合炉中也分熔化腔及保温腔），各有一套（有的熔化炉有两套）感应线圈、水套和熔沟，组成感应加热部分。埋于炉内的熔沟因线圈通电后产生感应电流，进而产生热并将铜熔化。为了保护线圈不至于发热太高而造成过烧，不但对线圈采取强制通水冷却，还在线圈外加一保护水套，期望水套能为线圈创造一个较冷的环境。正是水套的存在，带来了两大问题：水套的存在加大了感应熔沟与线圈之间的距离。水套本身有一定的尺寸，另外，在筑炉时，为避免损伤水套，感应熔沟与线圈之间的石英砂厚度选得比较大，客观上又加大了感应熔沟与线圈之间的距离。这突出地导致了感应炉的热效率偏低，实际使用功率只有 40%左右；另外，水套在使用 1～1.5 年后，易于老化，出现渗水，影响铜杆质量。这是因为水套靠近炉膛处的部分一直工作在冷热剧变的环境中，水套疲劳起皱而渗水。这种情况一经出现，就不得不停炉换水套或重新筑炉。因此，上引法降低能耗的方向，就是提高感应炉的热效率。要实现这一要求，应该用风套代替水套。风套的结构尺寸小于水套，筑炉时也不用担心损伤风套，可缩小感应熔沟与线圈之间的石英砂厚度，感应熔沟的结构尺寸也可缩小，这改变可大大提高感应炉的热效率，降低电能消耗；最突出的一点是风套代替水套后，不必担心水套老化的问题，感应炉的寿命得以大大延长。用风套代替水套，感应炉的寿命可超过 5 年，其经济效益相当可观。

2）改进的上引法铸机——目前铸机的年产能力已达 2～3t，铸杆直径从 ϕ8.0～ϕ30mm。为了进一步提高技术经济效果，研究和改进的目标在于：改进铸机，有效地生产无缺陷的铜杆，以提高可拉性，提高拉线工厂的生产率，使总成本下降。从技术上说，以小的改进，取得大的效果。它的改进点主要在：①凝固与表面质量；②可拉性与表面质量；③重新设计铸机的模子冷却器（结晶器）、改进和改变杆引出运动控制的软件。改进的模子冷却器，从凝固区进入循环冷却水，使其具有更有效的热交换效果。在铜杆和模子冷却器的内管材料之间尽可能地减小摩擦。采用伺服驱动引出凝固的杆和一套控制引出运动的新参数，使模子寿命增加和杆的表面质量提高。

3）铸杆拉线效果验证——新的“Outokumpu Upcast”系统的模子冷却器和浇铸程序开发后进行了工业规模的验证试验，并在“Al-CO”、“Sherburne Metal Product”和“Brazilian Cable manufacturer-Eletrocal”厂等进行了验证。表 3.2-29 和表 3.2-30 示出了拉线验证试验的结果，又据“Brazilian Cable manufacturer-Eletrocal”的报告称“由于采用了新的铸机系统石墨模寿命几乎增加了 100%（与普通的“Upcast”铸机相比），他们已消除了所有与材料有关的断线，在浇铸过程中排除了因石墨模磨损等引起停机的干扰”。为了节约投资、降低成本和提高铸杆的质量对旧式“Upcast”铸机的翻新设计亦已开发。

4.3.4 浸涂法无氧铜杆生产

（1）浸涂成形工艺的原理及生产过程。浸涂法成形的基本原理是以剥皮后的铜杆为芯线，在浸涂坩埚中熔融的铜液由于沉积作用在芯线表面结晶和增厚，从而使芯线变粗成为铜杆。浸涂法无氧铜杆的生产过程如图 3.2-32 所示。在这过程中，起始进入的芯线在熔融铜中浸涂了约为其两倍的重量，而得到的出线率则为起始进入芯线的 3 倍，出线产量的 1/3 作为这一过程再生产用的芯线，也称母杆或循环杆，2/3（即等于纯粹从熔融铜料获得的出线量）则成为供拉线机用的成品线杆。正因为此法基于固体芯线以吸取熔融的金属中的熔化热而提高自身温度的原理，由于金属的热容量为温度的函数，通过简单的热平衡计算，即可得到凝固的金属与进入的固体芯线金属之比，就铜而言，当出杆温度为 1050℃时，0.453kg 的室温铜约将凝固 0.9kg 的熔融铜。

表 3.2-29　土耳其“Al-CO”的拉线统计比较

拉线 \ 杆	ϕ8.0mm 韧铜杆	ϕ8.0mm “Upcast”杆	ϕ8.0mm “Upcast”杆，用新设计的模子冷却器
大拉和中拉	约 9～10t/断一个头	规格：ϕ0.45mm 及以上，无断头	规格：ϕ0.45mm 及以上，无断头
单根出线小拉（ϕ0.10～0.12mm；速度 25m/s）	480～580kg/断一个头	680～880kg/断一个头	2000kg/断一个头
多根出线拉线（ϕ0.10～0.12mm；速度 17m/s）	2000～2200kg/断一个头	3300～4000kg/断一个头	速度可增加到 23m/s

表 3.2-30　美国“Sherkurne Metal Product”公司的拉线统计比较

拉线 \ 杆	ϕ8.0mm 韧铜杆	ϕ8.0mm “Upcast”杆
多根出线拉线（ϕ0.404～0.254mm）	23 000～25 000kg/断一个头	200 000～225 000kg/断一个头
细拉（ϕ0.079～0.051mm）	70%/机器效率（230kg/天）	94%/机器效率（307kg/天）
16 根出线细拉（ϕ0.064～0.051mm）	不能运转生产	95～136kg/断一个头

注　该公司生产的“Upcast”杆拉到 ϕ0.254mm，速度 28m/s，断头率 570t/断一个头。

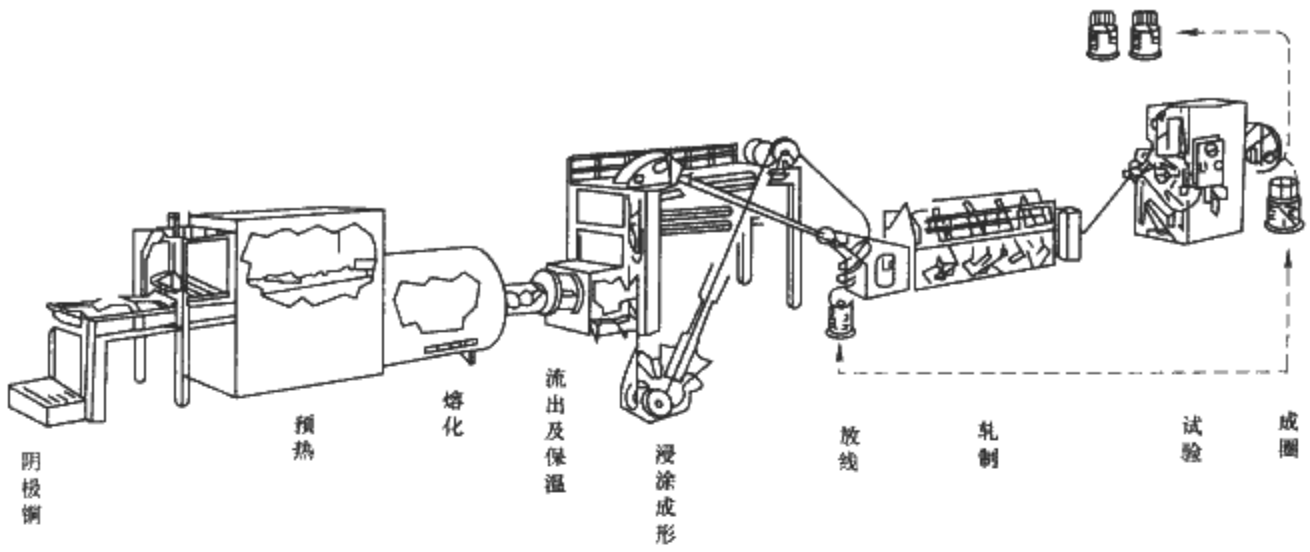


图 3.2-32 浸涂法无氧铜杆生产过程示意图

(2) 浸涂法无氧铜杆生产的特点。

1) 浸涂成形法与其他连铸法相比，热流是流向芯线内部，而不是流向模壁，所以没有模子和其他机械成型装置，更无模子表面的摩擦或润滑问题。

2) 从阴极铜进入预热炉开始直到成品杆出来的整个工艺过程都是在密封的可调节的气体介质中进行的，所以无需酸洗、清洗或其他处理，制品是连续大长度的光亮的无氧铜杆。

3) 浸涂成形法的总成本比较低，占地面积少，设备轻，铸杆轧机体积小、机架数（一般4个）随线杆的直径（一般14.2～8mm）而定。

(3) 浸涂成形法的主要装备及其功能。

电解铜加料装置——包括电解铜板的搬运、提升和真空提升机构，全部自动操作。

预热炉——系电解铜的烘炉，在保护性气体中经800～900℃预热。预热方法有煤气直接燃烧和间接燃烧两种。经预热可大大节省熔铜炉所需的电力消耗。

熔铜炉——属工频感应炉，熔化的铜液经流槽送向保温炉，熔铜能力3.6～12t/h。

保温炉——属工频感应电炉，使铜液温度保持恒定，并向浸涂坩埚提供铜液。

浸涂坩埚——系整个系统的核心装置，由石墨做成，用于在清洁的芯线上使铜液沉积、结晶和增厚。在开车初始阶段，通过坩埚周围的高频线圈进行加热。

冷却塔——将浸涂的铜杆冷却到合适的热轧温度(700～800℃)，并将浸涂杆导向热轧机。

热轧机——系连轧机组，每个机架都由各自的直流电机驱动。每个机架的轧辊对水平面的倾角为45°，相邻轧辊间的夹角为90°，实现无扭转轧制。由于轧制在含有保护性气体的全封闭系统中工作，因此不会使铜杆产生氧化。

冷却系统——由致冷设备和冷却管组成，使轧出的铜杆冷却到常温。

收杆成圈装置——收杆分动盘和静盘两种，收杆速度可调整到与生产线同步，自动换盘，成圈质量1～10t。

煤气发生器——用石油液化气或天然气在燃烧室中燃烧，将产生的热气导入预热炉、熔铜炉、保温炉、坩埚和热轧机内。最后，将 CO_2 和 H_2O 经精炼塔排出。

拉线和剥皮机——将成圈的杆，经几道拉模拉到母杆（循环杆）的要求尺寸，然后用一个剥皮模将母杆的整个表面剥去约0.0254mm的厚度。母杆经剥皮后直到坩埚的底部都处于真空的条件下，这样母杆剥皮后直到和熔融铜接触，是在真空中移动的。

浸涂成型工艺生产铜杆的生产能力，如表3.2-31所示。

表 3.2-31 浸涂成型工艺铜杆生产能力估算

生产能力（t/月）	1500	3000	6000
铜杆净产量（t/h）	3.6	6	12
芯线直径（mm）	6.25	9.6	12.7
浸涂铜杆直径（mm）	10.4	15.9	20.7

(4) 浸涂法无氧铜杆工艺因素对质量的影响。

1) 金属杂质元素对铜杆质量有明显影响——实践证明，铁、磷、铅、砷、氧、硫和银等单项元素变化，对铜杆质量有明显的影响（见表3.2-32）。表中序号1～8，电导率均不到100% IACS，这是由于操作掉入铁块和采用磷脱氧的错误，导致铁、磷增加所致；序号10～13，电导率并不高（在101% IACS以下），主要是铁、砷、硅、银和硫偏高，而在此情况下氧又偏低[$(3\sim5)\times10^{-6}$]，可见在金属杂质偏高、氧又偏低的情况下对铜的性能是有影响的；序号9，由于砷、铅偏高，故铜杆出现严重裂口。

表 3.2-32 单项杂质元素对浸涂法铜杆质量的影响

序号	单项杂质元素含量（$\times10^{-6}$）																	金属杂质总量（$\times10^{-6}$）	铜杆电导率（%IACS）	铜杆外观质量
	硅	锰	铬	铝	铁	镍	钴	砷	铅	锡	锑	铋	银	氧	氢	硫	磷			
1	9	1	1	1	150	4	1	1	12	2	9	1	119	4.3	—	—	24	311	96.3	
2	31	16	1	1	81	3	1	1	1	2	1	1	94	5.9	—	—	26	234	96.3	
3	9	3	1	1	58	4	1	1	11	4	1	1	114	8.9	—	—	21	209	96.1	裂口较多
4	21	1	1	1	170	3	1	1	1	14	1	1	109	7.3	—	7.8	26	331	96.4	
5	1	1	1	1	56	1	1	1	1	1	1	1	38	3.5	3.5	—	5.5	105	97.9	
6	1	1	1	1	42	1	1	1	1	1	1	1	39	6.7	4.0	5.0	5.1	92	98.1	
7	8	1	1	1	42	1	1	1	1	1	1	1	31	3.0	4.1	4.0	6	91	99.72	
8	5	1	1	1	37	1	1	1	1	1	1	1	24	4.6	3.1	4.4	6	76	100.56	

续表

序号	单项杂质元素含量（$\times10^{-6}$）																	金属杂质总量（$\times10^{-6}$）	铜杆电导率（%IACS）	铜杆外观质量
	硅	锰	铬	铝	铁	镍	钴	砷	铅	锡	锑	铋	银	氧	氢	硫	磷			
9	1	1	1	1	4	6	1	25	13	1	2	1	39	5.1	7.6	3.5	50	96	101.2	裂口严重
10	1	1	1	1	18	1	1	2	1	3	1	1	19	4.0	—	10	13	51	100.5	
11	6	1	1	1	17	1	1	5	1	2	1	1	18	5.0	3.3	20	3	56	100.62	
12	4	1	1	1	15	1	1	5	1	1	1	1	16	3.2	2.9	20	4	49	100.94	
13	2	1	1	1	14	1	1	5	1	1	1	1	15	4.2	5.0	10	4	45	—	

2）含氧量的高、低也是影响质量的重要因素——浸涂法的含氧量一般在（2～9）$\times10^{-6}$。铜中杂质高、含氧量低影响电导率；含氧量高无氧铜杆表面会频繁出现黑斑，在轧制时引起锯齿形裂口。氧含量对浸涂杆质量的影响见表 3.2-33。氧可与坩埚中的热石墨元件发生反应，生成不溶于铜的 CO 气体，CO 气体以小气泡聚集在芯杆上，当芯杆温度升高时气泡膨胀，使得浸涂杆表面产生波浪。较大的气泡在膨胀时甚至能使芯杆与涂层之间形成很大的气孔或气泡。为了降低含氧量可采取铜液表面覆盖 100～150mm 厚的木炭层，并向炉内空间充入含有 2%氢气的氮气，以防空气从加料门缝进入炉内与铜液直接接触。木炭与铜液中的氧发生还原作用。此外，亦可采取扒渣、添加新木炭和静置还原以及清除炉壁上的铜包（氧化铜）等方法，以防加入电解铜时所引起的振动使之掉入铜液，从而使铜液中的氧含量突然增加。

表 3.2-33 氧含量对浸涂杆质量的影响

序 号	含氧量（$\times10^{-6}$）	浸涂杆质量
1	54	很粗糙
2	247	很粗糙
		有横裂纹
3	4	很光滑
4	4	很光滑
5	10	很光滑
6	41	许多深凹陷
7	26	一些深凹陷
8	18	光滑
9	34	许多深凹陷
10	30	一些浅凹陷
11	17	光滑

3）循环芯杆的质量是影响铜杆外观质量的关键因素——芯杆上大多数的缺陷在制成成品杆的过程中大大扩大了，生产过程中的废品主要是由芯杆缺陷引起的。芯杆每循环一次，其外观质量就降低一次。为确保芯杆质量，必须严格控制生产中各个环节的一系列因素。究其原因，当带有细小裂口的循环杆通过扒皮模时，附在裂口里的润滑油会随着芯杆一起进入浸涂坩埚里，并在铜液中以 5000∶1 迅速膨胀，从而形成一个大气泡，气孔则从芯杆表面逐渐延伸到浸涂杆外表面。如果这根浸涂杆再一次经扒皮作芯杆进入坩埚时，将重复上述现象，久而久之，使大量的润滑油带入坩埚，从而使浸涂杆造成更多及更大的纵向裂口，故在轧制时易被轧断。

4）真空度、坩埚及浸涂温度应当关注——应提高工艺过程中的真空度，坩埚及保温炉温度应能自动控制，其中保温炉的温度应保持在 1140℃，坩埚保持在 1114℃。另外，冷却水的流量应正常。

5 废杂铜的直接再生应用

5.1 废杂铜直接再生铜导体的应用

废杂铜在导体中的应用已是全世界的趋势。与原生金属相比，用再生资源生产每吨铜和铝可以分别减少能源消耗约 80%和 95%；生产每吨金属可减少基本建设投资 60%；还可以明显减少“三废”的产生量和排放量，有效保护生态环境。生产 1t 再生铜，可以少排放约 100t 工业废渣和 2t 二氧化硫；生产 1t 再生铝，约少排放 1.5t 赤泥。

废杂铜的再生利用，在中国尚处发展的初级阶段。根据发达国家的经验，铜的消费与经济发展呈“钟”形曲线的关系，我国铜（其中电缆工业是消费大户）的消费还远未达到“钟”型曲线的顶点，也就是说，在未来很长一段时间内，我国对铜的需求量将不断上升，铜已成为除石油、天然气之外，处于第二位的制约我国国民经济发展的物资。我国铜资源严重短缺，发展再生铜是解决铜资源缺口的主要途径。

废杂铜的再生利用技术可分为直接利用（这里阐述的仅是直接再生利用）和间接利用。单纯的废杂铜和牌号单一的铜合金废料，一般都采用直接利用技术来生产各种铜材及制品。混杂的废杂铜采取间接利用技术生产电解铜，最常用的是两段法，即反射炉熔炼—电解精炼工艺，已成为用废杂铜生产精铜的经典工艺，并被广泛应用。

2006 年我国电缆工业作导体用的用铜量和 2006 年我国精铜和废杂铜概况如表 3.2-34 所示。在 354 万 t 导体用铜中有相当一部分用的是废杂铜的再生铜，其中有直接利用的，也有制成电解铜后间接利用的。

表 3.2-34 2006 年中国铜导体、精铜和废杂铜概况

名 称	数量（万 t）	备 注
电缆工业导体用铜量	354.0	—
精铜消耗量	380.0	—
电解铜产量	300.0	—
进口含铜废料	494.0	折铜 98.8 万 t
国内回收进入流通领域的废杂铜	68.0	中国废杂铜回收高峰预计在 2010 年以后
再生铜产量	80.0	占精铜消耗量的 21%

线缆产品应用的铜导线，其所需的规格和质量要求是不同的。一般而言，质量要求最高、线又比较细的是细电磁线、通信和电子用铜线，而且往往采用高速和多根出线拉线。据 2003 年统计（可以作为参考），线缆产品应用铜导线的规格及其所占的份额（如表 3.2-35 所示）可以看出：有相当大的数量是可以应用直接再生铜做导体的，但必须达到产品的标准要求，当然对档次比较高的铜导线仍

然需要用99.95%及以上的阴极铜和99.99%的A级阴极铜生产。

由上表可以看出：废杂铜在导体中的应用从国家角度和市场角度来看是必然的，现在的问题是废杂铜在中国，特别是直接再生应用于导体、用于制造铜杆和铜型材的废杂铜，如何用好它，做到物尽其用、对路适用。用废杂铜直接生产的低氧铜杆（韧铜杆），尽管其质量档次要比阴极铜生产的铜杆低，但这种杆用于拉制较大（粗）规格的线用在线缆产品中尚有相当大的市场份额（见表3.2-35）。

表3.2-35　　线缆产品应用铜导线的规格及其所占份额

序号	线缆产品类别	铜线规格（mm）	2003年铜导体用量（万t）	份　额（%）
1	电力电缆 建筑用线 电磁线	1.10以上	52.0 25.0 15.0 计（92.0）	47.70
2	通信线 电磁线 电气装备用线	0.4～1.10	18.0 15.0 23.0 计（56.0）	29.0
3	软线 电磁线	0.12～0.4	3.0 20.0 计（23.0）	11.9
4	电磁线	0.12以下	7.0 计（7.0）	3.6
5	裸铜排、梯排	型材	15.0 计（15.0）	7.8
总计：193万t				

注　电气装备用线包括：建筑用线、家电线束、控制电缆、汽车用线、煤矿电缆、橡套电缆等。

废杂铜在导体中的应用，无论从废杂铜预处理的方式和设备或是从制杆的关键生产工艺、装备、必要的测试手段、达标水平以及对环境的污染水平尚属初级阶段，政府应出政策法规，废杂铜处理行业、冶金行业和电线电缆行业间应加强合作，从现在的再生利用向节约利用和高效利用型转变。

目前，影响铜杆质量和造成环境污染的主要关键在于：废杂铜的前处理，其中首先涉及废杂铜的分类、分级，然后是前处理的方法和装备；废杂铜的熔炼技术和装备以及三废处理技术和装备。

5.2　废杂铜在低氧光亮（韧铜）铜杆生产中的应用

自从20世纪80年代由意大利和西班牙合作开发了“Properzi-La Far Lacambra”法以来，在国际上已有一席之地。尽管FRHC杆的质量档次要比电解生产的低氧铜杆低（见表3.2-36），但其性能仍可达到ASTM B49和ISO 1555标准的要求，而且价格较低，可拉性可达到直径0.3mm。为了迎合用户对不同质量档次铜杆的需求，一是在原有竖炉熔化连铸连轧生产线的基础上，增加废杂铜经挑选直接使用）熔炼系统，形成一机两用，供应两种不同质量档次的铜杆；二是建立废杂铜（经挑选直接使用）熔炼—连铸连轧生产线，专供低档次的铜杆。“Properzi-La Far Lacambra”法，在技术上针对废杂铜的直接应用进行了切实的创新（见图3.2-33），简化了工艺流程。挑选和控制使用废杂铜等级（见表3.2-37）；采用高温处理工艺，并装备倾动式精炼炉（见图3.2-34～图3.2-36），整个过程从废杂铜开始经熔化、精炼、连铸、凝固和连轧，直至生产出成圈的成品铜杆。

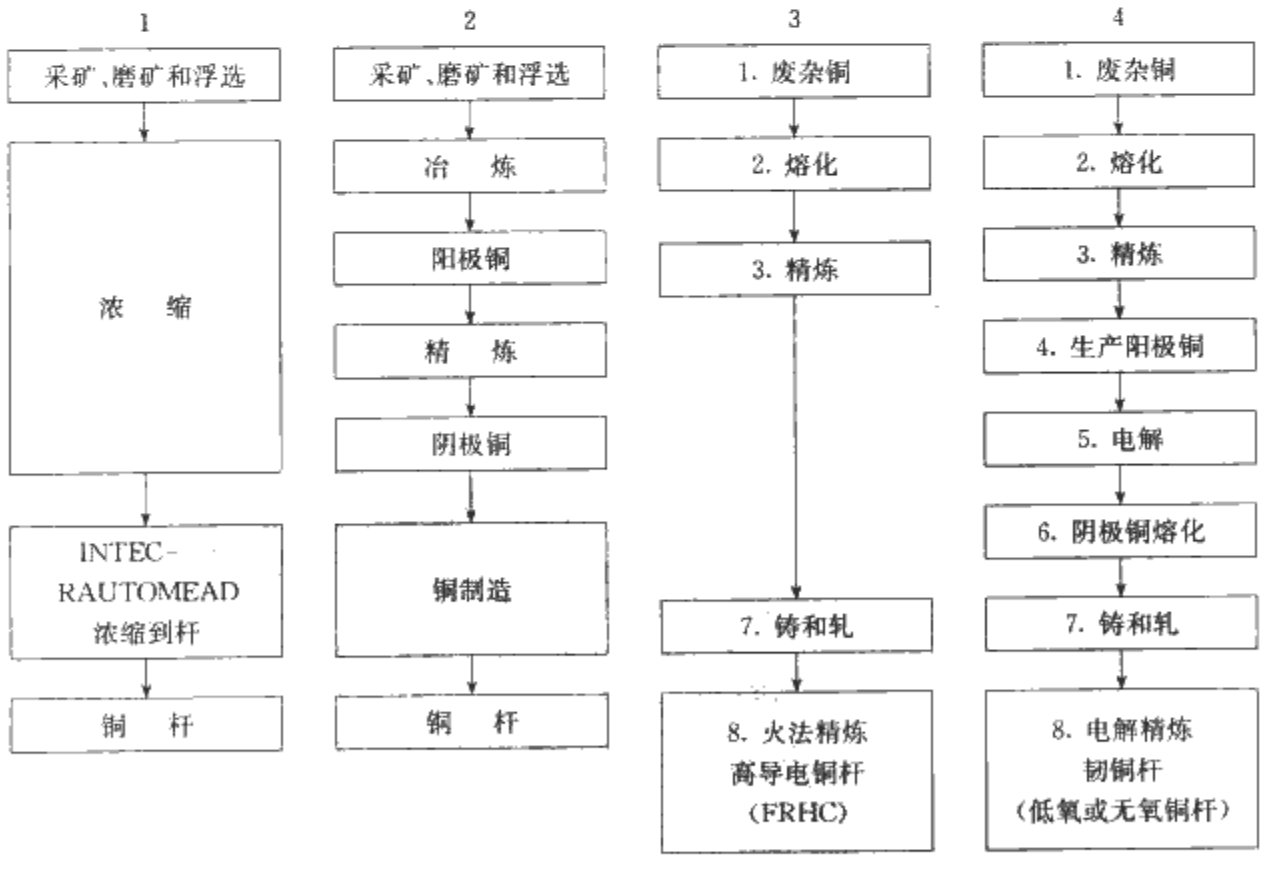


图3.2-33　四种铜杆制造过程比较

1—INTEC/RAUTOMEAD法铜杆制造过程（正在开发之中）；2—现有的铜杆制造过程；3—用废杂铜直接生产低氧铜杆（FRHC法）制造过程；4—用废杂铜常规的铜杆制造过程（废杂铜经再生处理制成阴极铜后，用于生产低氧或无氧铜杆）

表 3.2-36 火法精炼高导电韧铜（F. R. H. C）杆和用电解铜制造的低氧铜（E. T. P 电解精炼韧铜）杆的性能比较

杆的特性 \ 铜杆类别	单 位	铜杆类型	
		F. R. H. C	E. T. P
含铜量	—	>99.91%	>99.95%
杂质	$\times10^{-6}$	700	150
氧	$\times10^{-6}$	250～400	200～300
伸长率 A100 A200	% %	40～45 35(39)～40(42)	45～50 40～45
抗拉强度	MPa	230～240	220～240
电导率	% IACS	>100	>100
扭转试验到破坏	N°	>40～45	>50～55
可拉性	mm	0.30	0.05
再结晶温度	℃	300～325	250～275
氧化层 pops 试验	10^{-10}m	<1000	<1000

表 3.2-37 Properzi-La Farga Lacambra 系统使用的原材料范围

废杂铜级别	该级别废杂铜情况
特级废杂铜和 1 级粒状废杂铜	这种材料由清洁的、不镀锡的、无包覆层的和非合金化的铜线和电缆所组成；务必不要烧过的线，因为它是脆性的。如果提供的是粗的电缆，那么诸如铅、锡、镍等杂质可能是存在的。 对“kanal”或“birch”废杂铜由标称含铜量为 96%的非合金化的铜所组成。它们没有过多地镀铅、镀锡、镀焊料的铜线或黄铜和青铜线。它们亦不应有灰粉
2 级废杂铜（“Birch”和“Candy”）	由小直径的、没有绝缘的、通常为电话线的铜线和清洁的、大、小直径的铜管所组成。 对粒状铜（“clove”），这种废杂铜是被切断的，没有绝缘的铜线。无包覆层的非合金化的废铜线颗粒是没有锡、铅、铝或铁的，具有的最小含铜量为 99%
3 级废杂铜（“Dream”）	这些废杂铜常常是混杂的，非合金化废杂铜的混合物，其标称含铜量为 92%。它们通常由铜皮、蒸气管、落水管、热水器和类似的废杂铜所组成。它们不应有绝缘物、制冷器、散热器、屏蔽物和过多地镀铅、镀锡和镀焊料的废杂铜以及应没有油

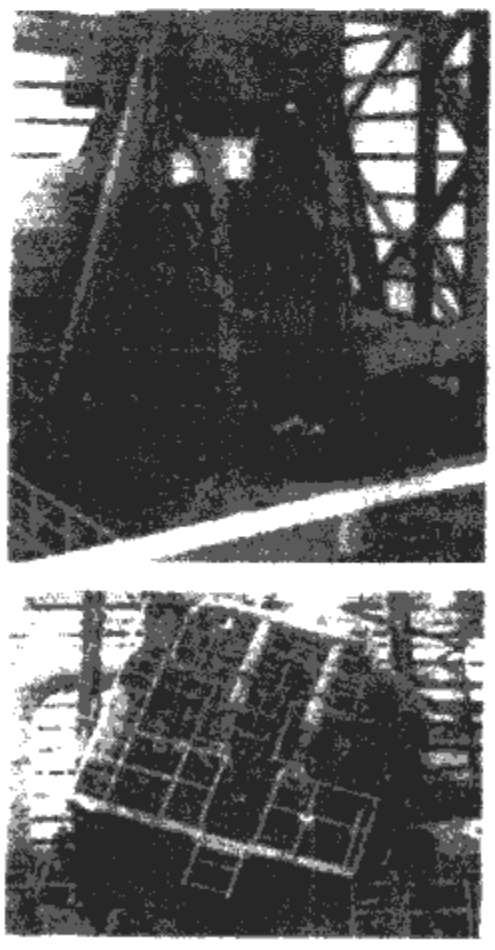
注 为了获得最好的结果建议加入炉内的材料其组成比例如下：1 级废杂铜 30%；2 级废杂铜 60%；粒状和 3 级废杂铜 10%。

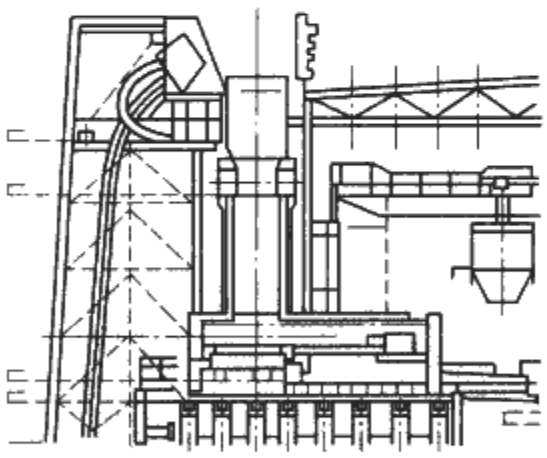


(a) (b)

图 3.2-34 Properzi-La Far lacambra 法生产线和废杂铜精炼炉

（a）Properzi-La Far lacambra 法生产线；（b）废杂铜精炼炉





说明：炉床—竖炉组合炉(炉子可倾动或静置，用于废杂铜的熔炼，能力可达90 t/h；竖炉—熔化废杂铜，炉床—集中铜液、加热和处理)。

图 3.2-35 炉床—竖炉组合炉

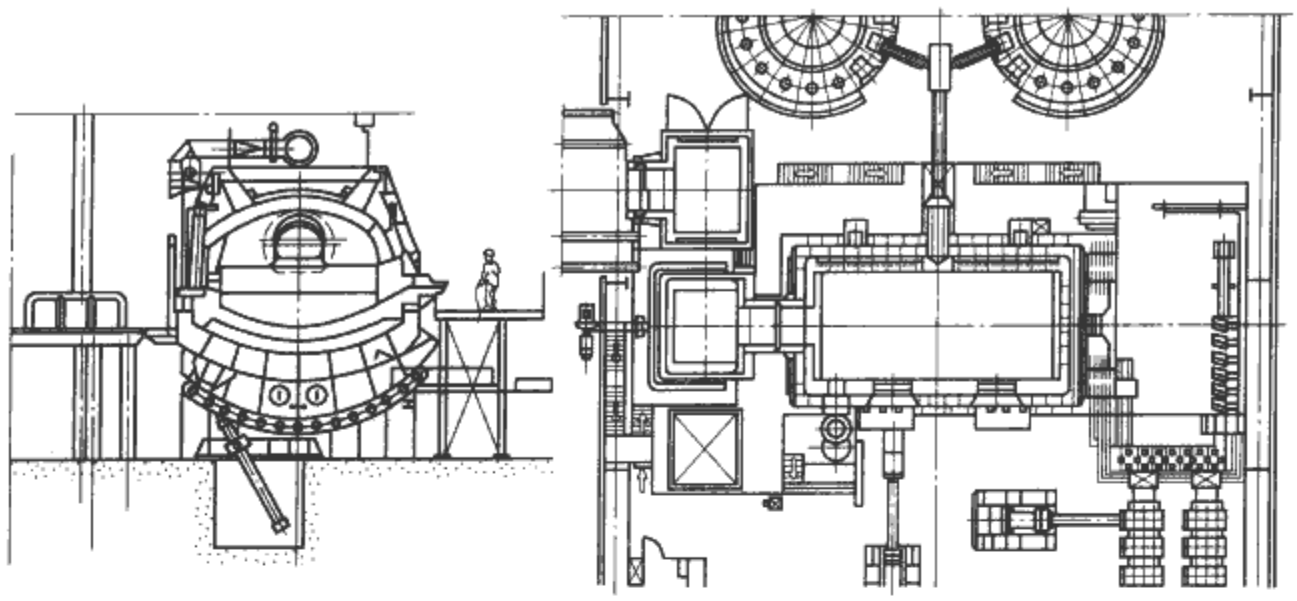


图 3.2-36 倾动式反射炉

(熔炼和精炼废杂铜，用于处理较低级别的废杂铜，能力可达 350t)

显然，这种工艺的核心是精炼炉（能力：25t/天、40t/天和 80t/天）。这些精炼炉的特点在于基本的砌筑和可以倾动。镁砖和浇铸成形件是必须使用的，以经受氧和添加剂、氧化物以及炉渣和烟等其他组分的化学侵蚀。因为基本的耐火材料在加热和冷却期间是易于损坏的，所以炉子必须保持在高温之下。

炉子倾动之所以必要，在操作时不仅为了控制浇铸，而且亦因在本工艺的精炼阶段需要在熔体平面的下面注入蒸汽、空气和燃料油（燃烧剂）。这个操作是通过 1 根、2 根或 3 根吹管来完成的，在加料和熔化操作时吹管被置于熔体平面的上方，当精炼时置于熔体平面的下面。炉子的倾斜由两个支架支持。

一个主烧嘴通常装在炉子的一个短墙上，烧嘴能用低硫的气体或燃料油燃烧。在最大的炉子中有一个加氧辅助烧嘴置于炉子的顶部，以缩短熔化期。

装料和熔化期约需持续 8h。采用可调强力火焰喷嘴（氧化和还原时均需添加辅助材料）使快速熔化和充分的炉料氧化成为可能。在炉内的温度被保持在高的水平上，以使熔体铜获得最好的均匀化作用。在最初的表面渣已经除去以后，熔池的氧化是通过在液面下面吹入空气来完成的。

当炉子被保持在离地平 20°的位置上时这个操作通常持续 2h，直到氧达到 $(10\,000 \sim 12\,000) \times 10^{-6}$。被氧化的杂质变得比熔体铜轻，并漂浮在熔池的表面上形成“二次”渣。为了帮助这个反应要在熔化物中加入一些反应剂。

由于可被使用的金属有不同的来源和有很大的变化，所以在使用废杂铜的任一工艺时熔体铜的精炼技术可能有很大的不同。

在废杂铜中所发现的主要的基本杂质是铅、锡、锌、铁、镍、砷、锑和杂硫（见表 3.2-38）。少量的铋、碲、铬和银偶然亦会发现。

表 3.2-38 化学成分平均值 $\times 10^{-6}$

元素 \ 废铜级别	特级和 1 级粒状废杂铜	1 级废杂铜	粒状铜	“Kanal”或“Birch”或 2 级废杂铜	3 级废杂铜和杂质含量高的粒状铜
铅	≤5	<100	<500	<1000	<5000
锡	≤4	<300	<100	<800	<9000
镍	≤4	<50	<150	<150	<3000
锌	≤25	<50	<200	<300	<12 000
锑	≤2	<20	<50	<100	<1000
硫	≤15	<15	<100	<200	<800
铝	≤5	<50	<40	<200	<1000
铁	≤25	<50	<200	<500	<1000
银	≤1	<50	<50	<50	<500
熔体损耗的平均值	≤1.0%	<2.0%	≤2.0%	<2.5%	≤2~8%

要除去有时相对地存在的大量的铅、锡杂质可能会引起某些困难；同样的情况也适用于镍，因为这个元素对铜杆的电导率亦有不利的影响。在此种情况下，采用二次精炼（第二个精炼、操作过程）可能是必需的，以完全地除去杂质。专用的添加剂亦应加入熔体，以获得充分的精炼。

由于杂质的相对数量和多样性（这都取决于所用的废杂铜），所以每炉熔体就有它的“特殊性”。因而精炼的方法每次必须加以调整，以和已知的（按预先的记录）熔体成分相适应。

此时，最后的精炼和还原操作需要从熔池除去最后的渣和添加剂。在撇去渣以后炉子再次倾斜，以允许蒸汽和燃料油进入熔体，使氧含量猛烈地减少到小于 500×10^{-6}。在浇铸操作能够开始以前，那时在熔池内的氧含量最终调整到 $(200 \sim 350) \times 10^{-6}$ 的要求值。

近乎标准熔体的举例如表 3.2-39 所示。

当精炼时其他杂质的含量一般降到 5×10^{-6} 以下。

铜的连铸连轧以及成品杆的成圈可在各种型式的连铸连轧生产线上完成。生产线的能力从 3.5t/h 到 12t/h 及更大。

这些标准能力的计算允许在一个班或不到一个班中精炼炉放空。有关高温处理工艺的正常工作期见表 3.2-40。

表 3.2-39 杂 质 比 较

杂 质	精炼前 ($\times10^{-6}$)	精炼后 ($\times10^{-6}$)
铅	400～700	70～90
锡	150～300	50～60
镍	80～100	50
锌	60～80	<10
铁	50～80	<10

表 3.2-40 工艺的正常工作周期

时 间 (h)	操 作
8	装料—熔化
4	氧化—出渣
4	还原
8	浇铸/轧制

高温精炼处理工艺并不是一种清洁的操作，但当安装了污染控制设备时就大大减少对环境的污染。来自精炼炉的烟（由固体粒子和无高污染的酸气组成）通过接到炉身顶部的一根管子被排出去；废气的流动由一个自动闸板调节。在炉身底部里的气体流动和压力由自动压力控制设备控制。当加料和造渣时，为了排出来自炉子的烟，排气罩作为第二个通风系统。

炉子的废气在一个高收集率的纤维织物收集器（袋室）中被净化。当废气通过纤维织物收集器时灰尘从废气中分离到过滤袋的外边。袋的清理是自动和连续的，不必在线上除去任何组成部分。通常，这清理装置是一个脉动—清理纤维织物过滤器系统。它们在相反的方向上使过滤气体产生一个快而强力的压力脉动，从而可改善清理的效果，而且这装置比传统的脉动—喷射设计的功率消耗要低。为了避免太高温的废气进入纤维织物收集器，所以有一个保护装置可自动地打开渗漏空气调节器。

从过滤器到收集箱的灰尘运输系统是一个机械传动的输送器。

5.3 废杂铜在无氧铜杆生产中的应用

众所周知，上引法无氧铜杆需要较高的原材料，但用废杂铜直接生产无氧铜杆有市场需求，因此这种技术多年来已被杆、线制造者所关注，但目前的生产规模还比较小，尚待进一步开发和应用。“RAUTOMEAD”公司开发的用废杂铜直接制造无氧铜杆的新技术，采用 RFS 系列废杂铜制杆连铸机（见图 3.2-37），它由废杂铜到杆只需一次转换，采用（熔、铸）组合式的石墨炉和牺牲石墨炉衬技术，为调节氧允许具有较长的保持时间，使整个生产工艺过程处于自动监测和控制之下。该方法具有下列特点：

（1）原材料：清洁、干燥、去油和除漆（不用火烧）的来自工厂的压型废铜线或颗粒料或废料与 A 级铜掺和在一起使用，废料要压紧到大约 6.5g/cm³ 或更高的密度，其尺寸为 350mm(长)×200mm(宽)×75mm(高)，以便喂料。这样做的目的在于降低含氧量，取得最佳的效果。对带有绝缘漆或塑料的废线必须在喂入前除去。加料方式与用电解铜的不同，不能用散料，只能用压型料（见图 3.2-38），从喂入孔送入。



图 3.2-37 RAUTOMEAD 无氧铜杆机组（RFS 系列）

（2）含氧量控制：通常废料的含氧量在(200～400)×10^{-6}，脱氧靠的是铜液与石墨坩埚相反应，如原料含氧高或装散料，则脱氧稳定保持时间要长(一般在 5～6h)。上引杆的含氧量可小于(10～15)×10^{-6}。

（3）浇铸模的寿命：处理 100%清洁的废料时，浇铸模的寿命约为 6t，增加电解铜的比例寿命增加。对 ϕ8.0mm 杆的引出速度约 3.6m/min。

（4）质量水平：只要废料质量有保证，可接近电解铜生产的无氧铜杆的水平，可拉性可拉到直径 0.1mm。电导率与废料质量直接相关，能达 100% IACS 及以上的水平。

（5）用废杂铜的无氧铜杆设备：目前开发的设备小时产量为 300kg 的 3 头连铸机，铸杆直径 8～12.7mm；采用电阻加热的双室石墨坩埚组合炉，充氮气保护石墨坩埚和电阻元件，坩埚容量 2000kg，为调节和还原氧，熔体的无运动时间要保持 5～6h；炉内采用牺牲石墨炉衬和过滤器，以使熔体有效地除去氧和夹杂物；成圈机能力 4t；耗电量 450kWh/t。

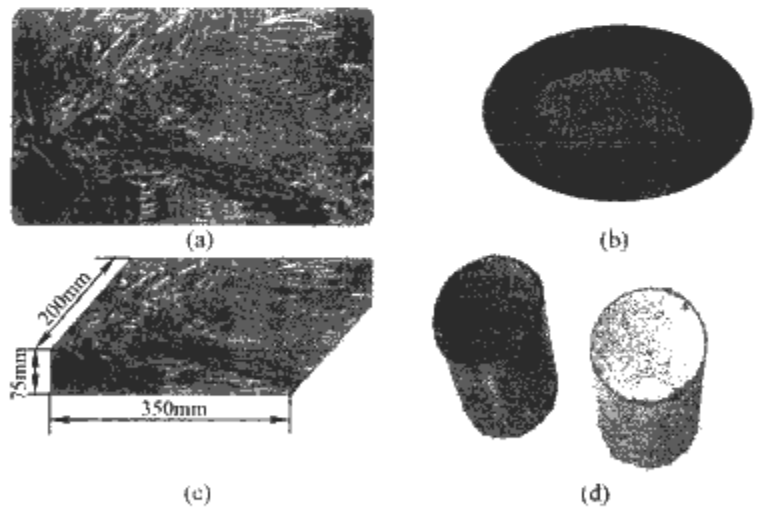


图 3.2-38 RAUTOMEAD 无氧铜杆机组用废杂铜原材料

（a）清洁的废铜线；（b）颗粒废铜；（c）压型废铜线密度 6.5g/cm³ 及以上；（d）压型颗粒废铜

近年来，我国南方冶金学院、云南铜业有限公司对稀土在“利用废旧紫铜生产上引铸造无氧铜杆”和“稀土在铜线杆生产中对质量的影响”进行了研究和讨论。与其他国内外

的研究相类似，稀土在低氧和无氧铜杆生产中的应用，由于具有细化晶粒、净化铜液的作用而有利于改善工艺性能；研究认为使用稀土盐、稀土铜中间合金的复合精炼剂，能够避免两种精炼剂单独使用时的缺点，发挥各自的优势。这一优势如能在铜杆的可轧性（可铸性）、可拉性和可退火性上，并在产品的性能上作出全面的验证，那将对生产和应用具有实际的意义。

6 电工铜线生产

6.1 电工铜线生产的可轧性、可拉性和可退火性

在电线电缆的成本构成中，占80%左右是材料，尤其是导体用铜。随着电缆工业的迅速发展，为了提高劳动生产率、扩大品种、增加技术经济效益，因此拉线速度和头数越来越高和多，0.10～0.50mm的线，头数已达40根，最高速度可达35m/s；线越拉越细，最细线径已达0.012mm；线的质量指标越来越多，对断头率、柔软性、表面质量和每轴的连续长度（重量）都有高的要求；拉线—制线多工序“一条龙”生产等都要求提供高质量的铜导体，因为它是电线电缆的基础材料，也是线缆产品和生产的质量基础和效率基础。在电工铜线生产中铜杆是质量的中心，也是供需双方争议的焦点，也是期货市场中“阴极铜牌号注册”等级评定的依据之一。铜导线生产的质量链是很长的，影响因素甚多，互有因果关系（见图3.2-39），但技术核心和发展方向就在于要提高“可轧性”、“可拉性”和“可退火性”。

“可轧性”是针对连铸连轧低氧铜杆的质量而言的，它的优劣可用可拉性和可退火性来评价。它主要表现为气孔、外来的非金属和金属铁夹杂、皮上和皮下氧化物以及看得见和看不见的内外裂纹等。在整个导体生产中制杆具有最高的工艺性和需要很高的操作稳定性，这就是为什么在同样的设备上不同厂或同一厂不同时间，甚至同一天或不同班次杆的质量都会有所差别的主要原因之一。如果原材料及其成分、废杂铜的配比、含氧、铜液温度、连续浇铸的液位、轧辊的磨损等不能严格地监控和处置，杆的可轧性就不会好。为此采用新的工艺装备，如为了减少燃料成本，使用高热效和自动的空气—燃料比控制；为了获得快速响应，减少开始操作时氧含量控制不佳，采用燃料—控制系统；为了控制含氧量采用分析监控系统；为了控制浇铸液位，获得均一高质杆采用自动金属浇铸系统；为了减少杂质进入铜液的氧化铝或碳化硅（约20目左右）过滤装置（甚至在上引法制杆中，外来夹杂进入铜液较少的情况下，亦已采用石墨过滤装置）；为了减少氧化物等夹杂进入轧件，乳化油分段循环，并采取过滤措施，在轧机各机架入口增设高压喷枪；为了减少外来铁夹杂，降低粗轧机架轧制压缩率，提高轧辊寿命，轧件与导向、导轮接触的钢部件用铜合金和陶瓷材料代替；为改进铸条结晶的电磁搅拌系统；为了连续在线监测铜杆表面和次内层缺陷以及铁磁物质的涡流和磁性探伤仪；为了通过杆的扭转试验分析评估杆质量的扭转—探伤联合试验仪等已先后用于生产。

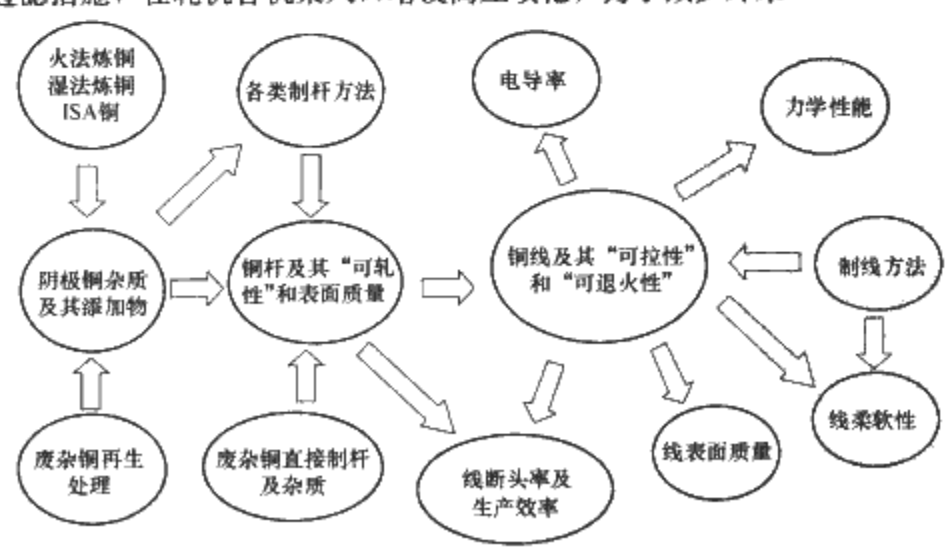


图3.2-39 以铜杆为中心的电工铜线生产质量因果关系

“可拉性”最直接的体现是拉制不同线径时的断头率。对外购铜杆的线缆厂，在拉制小线或微细线或在高速拉线机或多头拉线机或在多工序结合的在线连续生产的条件下，这个矛盾更为突出。要提高“可拉性”，降低拉线断头率，应从五个方面入手：提高制杆的质量；重视拉线的辅助系统（润滑剂及其过滤、控温、细菌性腐败和管理；拉线模及其材料、制模和检测精度；机械接触耐磨件的材料和设计制造）；把住拉线坯料（杆和半成品线）的进厂检验和中间检验，研究开发新的检验方法和设备，以科学的数据代替“感觉”说话。要注意含氧量外，还要注意可能偶然出现的氢脆在铜中的有害影响；为了提高线的可拉性和表面质量，在不得已和拉微、超微细线的情况下往往可采取一次剥皮，甚至2次剥皮的措施，但材料利用率和经济效果降低。近年来，用扫描电子显微镜等先进仪器研究漆包线用细线和微细线的断线原因指出：大多数断线与外来的“铁微粒”和“耐火材料微粒”有关。显然铁微粒来源与铜杆生产设备和拉线设备有关，至于耐火材料微粒在熔融铜的保持和流动过程中混入居多。如果仅从外来的微粒（铁微粒和耐火材料微粒）引起断线而言，那么上引法制杆由于其生产环节流程较短，且不经热轧加工，上引ϕ8.0mm杆可不用冷轧，而直接进入大拉机拉线，外来微粒进入铜杆的机率应比连铸连轧法制杆的小。

对拉细线和微细线的断线原因亦应充分考虑元素铋的有害作用。微细和超微细漆包线做成小型器件通电后出现的断线，还不应排除追查氢脆的原因，铜中氢的侵入可能来自拉线退火，连铸连轧和阴极铜电解时的有机添加剂。

随着汽车线束、电子、半导体封装、高保真音响、扬声器和电控元件等广泛采用高档细线、微细线和超微细线，制造这些高档线都要求具有优良和极优的可拉性；对原材料铜的纯度都要求在99.99%及以上；有的为了特殊的需要甚至要求使用单晶铜线。单晶铜线用单晶连铸技术（实质上是无氧铜连续引杆和定向凝固相结合的技术）制杆，然后通过拉线制成。目前，我国的高档线无论在品种及其制造技术上尚处开始阶段，需要深入发展。至于单晶铜杆和铜线更需继续提高，稳定杆的质量、研究改进它的拉线技术。

“可退火性”不仅仅表现在“柔软性”上，实际上还涉及结晶组织和再结晶温度。铜线的可退火性能对铜杆生产厂、铜线制造厂和器件生产厂而言都是一个很关心的问题，特别在电磁线、通信线等应用中，铜的可退火性已是一个极为重要的因素。铜中的杂质、材料在退火前的整个“制造履历”、退火工艺（温度、时间）、退火前的总压缩率、模角与退火组织、拉线温度与再结晶、织构和退火响应、再结晶温度、工艺与铜线组织的演变、晶粒趋向等都会影响最终的退火特性。

为了表征可退火性，现有不同的试验方法，用哪种量化的表征指标最为合适地表达柔软性已成为制线工业界令人关注和有待深化研究的问题。在实际生产中，往往在标准中与柔软性有关的指标都能合格，但在实际应用中柔软性却过不了关，或者不满意。当然，以“手感”来衡量柔软性是

不科学的，也无济于供需双方达成都可接受的协议。

6.2 铜杆的分等

对铜杆的分等既是铜杆生产厂的需要，也是制线厂的实际需要。但目前国内外无明确的铜杆分等标准可循，这给制定线缆产品专用标准带来了困难。铜杆制造厂一般都有自己的分等标准的，甚至在选料投产时早就考虑了用户对铜杆质量（等级）的要求。制线厂根据最终线、缆产品的要求，也要考虑选购质量（等级）合适的铜杆，但现在制线厂的难度就在于没有可靠的可预告铜杆质量判别的（进厂）检验方法，所以往往只能在拉线进程中用“中程断头率”淘汰法来进一步选材，以获得最终的线径和性能要求，并取得较高的生产效率和技术经济效果。根据线缆产品的用途和对铜杆质量的要求，一般可将铜杆分为下列级别，即：

1 级杆——用于电磁线、微细和超微细线以及冷镦粗等；

2 级杆——用于中等直径的线和细线等；

3 级杆——用于大直径的线和建筑用线等；

4 级杆——废杆回熔废料。

低氧铜杆的含氧量，全世界尚无统一的标准规定，一般 1 级、2 级和 3 级杆的含氧量分别为(200～350)×10^{-6}、(351～400)×10^{-6}和(401～600)×10^{-6}。表 3.2-41 示出了研讨性的 1～3 级低氧铜杆的质量指标，供参考。

表 3.2-41 1～3 级低氧铜杆的质量指标(供参考用)

指标 \ 级别		1 级	2 级	3 级
含氧量（×10^{-6}）	200～350	*		
	351～400		*	
	401～600			*
8.0mm 杆直径公差（mm）	±0.4	*	*	*
RTF 扭转试验（反向到断）	≥20	*		
	17～19		*	
	10～16			*
RT 扭转试验缺陷标准（反向扭）	0 缺陷	*		
	1 个缺陷		*	
	2 个缺陷			*
表面氧化物厚度（10^{-10}m）	≤400	*		
	401～800		*	
	801～1000			*
表面缺陷检测器计数	特大	0	0	≤1
	大	0	≤3	≥3
	中	2	≤10	≥10
	小	2000	≤10 000	>10 000
磁性缺陷检测器计数	大	0	≤1	>1
	小	≤2	≤10	>10
允许的工艺过程不一致性	可清除的黑垢	无	无	有
	磷—铜硬粒	无	无	无
	小的铸条开裂	无	无	有
	大的铸条开裂	无	无	无
	浇口原因	无	无	无
	氧化物落入	无	无	有
	轮刷原因	无	无	有

现行的 GB/T 3952—1998《电工用铜线坯》已不能适应线缆工业发展的需要，修订国标或制定电工用铜杆行业标准，实行按铜杆质量分等使用已势在必行。这也为进一步制定漆包线用铜杆专用标准奠定技术基础。

6.3 电磁线生产的特殊要求和专用试验方法

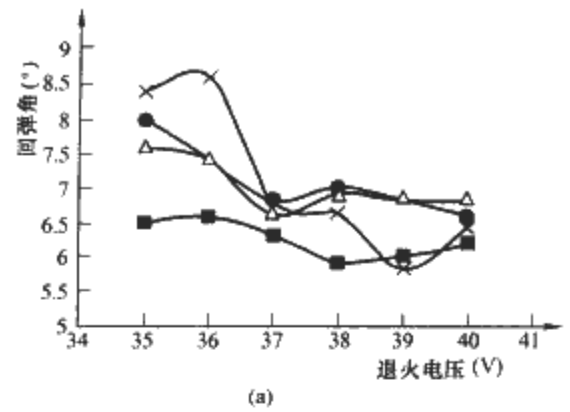
根据电磁线，特别漆包线应用要求的不同和涂漆质量的需要，对裸铜线的表面质量和柔软性(可退火性)有特殊的要求。裸铜线的表面质量除与拉线加工有一定的关系外，主要取决于铜杆的表面质量(特别是低氧铜的表面质量)。所谓铜杆的表面质量主要指的是在铸、轧过程中引起的表面缺陷，如气孔、金属和非金属夹杂、轧件复边、导卫刮伤、轧入氧化皮、皮下氧化物、表面氧化膜厚度和表面“均方根粗糙度 RMS(Root Mean Square Roughness)”等。据近年来用原子力显微镜 AFM(Atomic Force Microscop)研究表明：铜杆表面的均方根粗糙度与连铸连轧后连续清洗时所用的清洗液有关，最好的是 $H_2SO_4+H_2O_2$ 清洗液，其次，依次分别为 H_2SO_4、酒精清洗液和不清洗的上引法铜杆。裸铜线(包括涂漆后的漆包线)的柔软性，除与退火前的总加工率(一般不大于 70%～80%为宜)、无氧铜与低氧铜应采取不同的退火工艺和原材料铜杂质元素有关外，也受到退火工艺参数(温度、时间)、控制的退火程度(包括在拉线机上的中间退火和涂漆前，在漆包机上的成品退火)——完全退火或不完全退火(当然过退火是不容许的)和退火设备的明显影响，但柔软性也不是越软越好，要根据产品应用的要求而定。

6.3.1 退火工艺对柔软性的影响

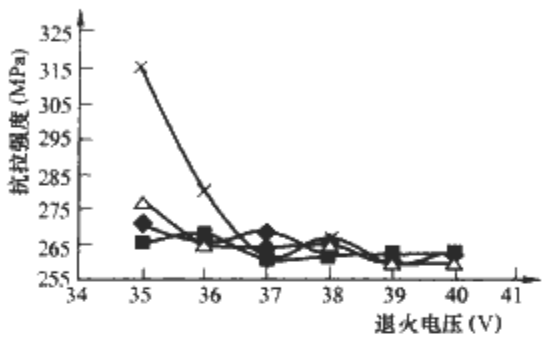
福州大通机电股份有限公司曾对上引无氧铜轧杆、上引无氧铜拉杆、SCR 法铜杆和 Contirod 法铜杆在制造漆包线时改变退火工艺对柔软性的影响进行了研究，并且也研究了中间退火的选择和退火程度的控制、在漆包机上的成品退火、退火装置和烘(漆)炉对漆包线柔软性的影响，其结论是：

(1) 根据内在组织的特征，无氧铜与低氧铜是不同的，无氧铜的再结晶温度比低氧铜的高，这是客观存在的。据近些年的应用实践表明，对无氧铜成功的退火要求是：由杆经拉制，但尚为铸造组织的线时的第一次退火，其退火功率应比同样情况的低氧铜高 10%～15%。经继续拉制，在以后阶段的退火功率只需比低氧铜的高 2%～3%。因此，对无氧铜和低氧铜应采用不同的退火工艺，如改变退火电压、拉线速度等；应重视退火工艺对改善无氧铜线的柔软性具有决定性的作用。在图 3.2-40 中示出了改变退火电压对回弹角、抗拉强度和延伸率的影响，由图可以看出：随着电压的提高，低氧铜线柔软性变化不很明显，而无氧铜线的柔软性则得到很大的改善，尤其当退火电压达到 42V 时，可以发现在图中的几个指标中，无氧铜线和低氧铜线的差别已是很小的了。

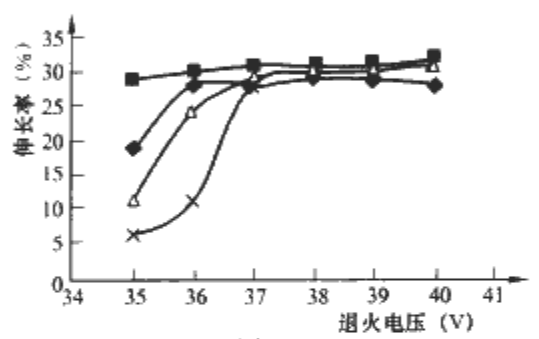
(2) 中间退火是选择在大拉过程，还是在中、小拉过程，要依据所生产的产品规格、用户要求及漆包机本身的成品退火能力而选择不同的方式、采用不同的控制程度，也就是说退火后半成品的伸长率要视具体情况控制在不同的范围。例如，同样生产 φ0.37mm 的漆包线，采用 φ8.00mm 杆—φ0.25mm—中间退火—φ0.95mm—中间退火—φ0.37mm—漆包机成品退火(炉)—烘(漆)炉的生产过程，由此生产出的漆包线，其伸长率就大大改善。在工序上进、出线的压缩率对退火效果亦有较大影响。



(a)



(b)



(c)

图 3.2-40 退火电压与回弹角、抗拉强度和延伸率的关系

(a) 铜杆回弹角比较；(b) 铜杆抗拉强度比较；

(c) 铜杆延伸率比较

◆—Contirod 法杆，ϕ8.0mm；

■—SCR 法杆，ϕ8.0mm；

△—上引法杆，ϕ14.4mm，冷轧到 ϕ7.2mm（无氧铜轧杆）；

×—上引法杆，ϕ14.4mm，用巨拉机拉到 ϕ8.0mm（无氧铜拉杆）

以上四种杆用 450 大拉机，在同样条件下拉到 ϕ2.5mm 的线。

中间退火对漆包线的柔软性是有很大影响的，不要认为目前漆包机本身都带有退火装置，因而对半成品的退火程度不加重视。事实上漆包机连拉机所需的半成品线很大部分是采用退火处理过的，它们一般在拉线机上进行大电流接触式退火。

(3) 在漆包机上的成品退火，退火时间是由退火炉长度和行线速度决定的，也就是说影响漆包线的质量中要同时考虑退火炉的长度、行线速度和退火温度，三者缺一不可。

随着退火温度的上升，通常伸长率增加、回弹角降低、柔软性也增加、抗拉强度就降低、电导率也随着提高。但退火温度过高或退火时间过长，伸长率和电导率等就向相反方向发展。当温度一般处于 500～550℃时，漆包线的伸长率、回弹角、柔软性和抗拉强度均变化不大，电气性能中的电阻几乎无明显变化。当退火温度过低时，伸长率较差，一般低于 20%。

在传统的退火方式中，退火温度和退火管的长度都是退火工艺中的决定性因素。但最新研制的等离子退火方式，改变了我们对退火的认识，该种方式可大大缩短退火管的长度，卧式机不超过 3m。同时不需要在退火前对导线进行清洗，另一优点是可以在退火管中对导线表面进行“修复”，由超高温去除导线表面的杂质，甚至缺陷如毛刺等。这种装备需用氮气保护。

(4) 退火装置对漆包线质量的影响主要是加长退火炉。国外漆包机的退火炉比较长，这样有利于改善退火效果，可提高行线速度，从而提高产量。国产退火炉一般卧式机 3～4m，进口的卧式机如 HN4 型退火炉长 9m、HE1000 型的退火炉长 8m、HF5 型退火炉长 13m、SML200 型退火炉长 15m。同时，国外选用部分废气加热加部分电加热的退火炉比纯电加热的退火炉要长 1～3m。退火炉不仅长度加长，而且温度分布也不同，如 HE1000 退火炉加热部分长 8m，冷却部分长 1.5m，当退火设定温度为 350℃时，在加热部分每间隔 1m，从进线口算起，在退火管中的温度分布为 380℃、373℃、369℃、363℃、371℃、366℃、324℃和 244℃。这样有利于获得细而均匀的等轴晶组织，漆包线的力学性能良好。

可起退火作用的不仅仅局限于退火炉，事实上漆包机上的烘炉，也有明显的退火效果，特别在生产聚酯亚胺、耐氟线等产品中，烘炉的温度高对导线显然更具退火作用。最新的高速漆包机的烘炉温度已高达 700～780℃。

6.3.2 表征导体可退火性（退火性能）的几项专用试验方法

退火工艺对导线柔软性的影响是很大的，但仅用伸长率、回弹角等国标中所规定的指标来表征柔软性、衡量电磁线质量的好坏，已不能满足生产厂和用户的实际需要。但至今我国和国外都还无电磁线用专用的铜杆和铜线标准可循，因而也无一套统一、完整的技术指标及其试验方法。现在，美国标准（ASTM）、国际标准化组织标准（ISO）、欧洲标准（EN）和“Olen refinery”标准中都已纳入了有关柔软性的试验方法。

(1) 电工用拉制铜杆标准对铜杆可退火性（退火性能，Annealability）的规定[1]。

1) 用硬度法表示的退火性能。用硬度试验表示的退火性能——合适长度的杆样取自每圈（捆）杆的端部。所取的试样应冷轧成扁平的形状，使其厚度等于原始杆径的 30%。要求无棱边轧制。轧扁的铜应在恒温槽中在(275±1)℃下加热 15min，然后立即在环境温度下的水中淬火。其他的温度和时间亦可使用，但需经供、需双方特别同意。按试验方法 E18，硬度应沿着退火试件的中心线用洛氏（Rockwell）硬度计的 F 刻度测定。

2) 用螺旋伸长（数）法表示的退火性能。用螺旋伸长数试验表示的退火性能——标准规定的螺旋伸长试验仅用于试验在铜杆阶段取样的高电导率的铜，不涉及以后工业加工阶段选择的铜线质量。首先铜线在严格控制的条件下给预低温退火，而后在拉力负荷下绕成一个螺旋管（螺旋形管），然后用规定的质量把它轴向伸长。在重量除去和螺旋管已经松弛后测量出的长度变化被视为柔软度的量度。

杆的处理——具有合适长度的杆样取自一批成圈（捆）杆的端部，如果必要，通过冷拉将其直径减缩到 $6.35^{+0.5}_{-0.25}$ mm

[1] 参考 ASTM B49—98《电工用拉制铜杆标准》。

或(8.0±0.40)mm。应按下列情况决定试样退火或不退火。

a. 如果铜是按规定的制造规范加工的，那么不进行退火处理。

b. 如果要求比较由不同的制造方法（工艺路线）生产的试样，那么试样应进行退火处理。在这种情况下，杆样应在正常的气氛下用(700±20)℃退火 1h，然后在水中或在环境温度下稀释的[10%V/V(体积/体积)]硫酸溶液中淬火。铜氧化皮应在 10%V/V 的硫酸槽中被除去，并彻底洗去疏松的氧化皮或附着的铜粉末。

螺旋伸长试验用线的制备——杆样应用一系列道次（每个道次的面积减缩率为 20%～25%）拉成直径为 2.0mm 的线。

在拉线时，要特别注意避免铜的过度发热。例如，线应允许在道次之间冷却 5min 或者在每个道次后淬火到环境温度。此外，拉制速度不应超过 60m/min，拉出的线应绕成具有最小直径为 200mm 的圈。

在拉制以后，应把导线绕在最小直径为 200mm 的芯轴上使之成形。然后，将铜圈从芯轴上取下，在恒温槽中在(200±0.5)℃下加热 2h，并立即冷却到环境温度。

铜线的温度必然保持均一，测量要十分精确。因为准确的温度控制是极为重要的，所以热电偶应放在整个退火设备的关键位置上。建议把一根直径为 8mm 的仿制的杆样成型成一个直径为 200mm 的环，且放在恒温槽中通常放试验线的位置上。把使用的一个热电偶埋入杆中，达到的深度等于半径，在 5min 内温度应达到退火的温度。

试验方法——从退火的线圈上取一根 1400mm 长的试样。用擦不掉的标记工具在铜线中部标出 1000mm 的标距。试样的一端被固紧在一根抛光芯轴的端部，这个芯轴的轴线是水平的，其直径为(20±0.01)mm。一个 2.240kg 的负荷悬挂在线的自由端，因此造成一个 7MPa 的应力。在约 50r/min 的速度下，旋转芯轴，把线绕成一个螺旋管，要特别注意的是螺旋管的每一圈（匝）与先前的一圈相接触，而且圈不能挤，应控制保持最小的空间，螺旋管的线，其前、后圈应绕成同一方向。

虽然在螺旋管上标距之间的长度约为 28mm，但这个距离应被测量精确到 1.0mm；并作为原始值“l_o”记录下来。

然后，由线绕成的螺旋管从芯轴上取下，注意固定一端，轴向负荷 2.240kg 加在另一（下）端，这个重量与上述绕螺旋管操作时所用的重量是一样的。

重量开始应由平台支持，然后把负荷均匀平稳地加到螺旋管上，加负荷的方法可用下列两者之一：①降低支持重量的平台；②升高螺旋管的上部。降低或升高的速率要使螺旋管的伸长不超过 20cm/s。

在自由悬挂 1min 后，用手非常留心地将荷重取下，并把伸长的螺旋管在桌子上再放 1min，使之松弛。应注意取下负荷不能采用升高平台或降低螺旋管上部的办法。测量标距之间螺旋管伸长的长度应精确到 1mm，并把这个数值“l_f”记录下来。用 mm 表示的螺旋管伸长值按 l_f-l_o 的差值进行计算。

同样的方法应在从同一圈内另外两个线的螺线管上重复进行，由此从 3 个单独的螺旋管所获得的平均值被称为螺旋伸长数（Spriral Elongation Number）。

(2) ASTM B279—04《制造电磁线用裸的、软的方形和矩形铜线及铝线柔软性试验方法》。该方法称为低应力伸长试验法（LSE Test）。根据试件受到低的拉应力后所产生的永久伸长来测定裸的、软的方形和矩形铜线和铝线的柔软性。由于施加的单位应力和施加应力的时间对线所有的规格都是不变的。所以这个试验能够在相同或不相同的线的规格之间所得到的柔软度进行比较。

低应力伸长试验在符合要求的拉力试验机上进行。为了测定伸长，试件标距长度采用 254mm。长度测量精度达到 0.25mm，可用任一精度达到 0.1%的仪器测量。对试件施加的应力，铜和铝分别为 103MPa 和 55MPa，由此可算出在试件上所需施加的拉力

$$P=\frac{KW}{L}$$

式中：P 为需要施加的拉力，N；W 为试件的质量，g；L 为试件的长度，mm；K 为对铜试件，对应长度（mm）、需要施加的拉力（N），$K=11\ 612.7$；对铝试件，对应长度（mm）、需要施加的拉力（N），$K=20\ 401.9$。

在拉力试验时，如果试件的断口发生在标距线上，则该试件作废。对试件施加拉力应慢慢、均匀地施加，并保持拉力 30s，然后除去拉力。在拉力除去以后，测量在两根标距线之间的永久伸长，其精度达到 0.25mm，可用分规或尺或其他合适的方法进行测量。低应力伸长（LSE）应被记录，它是标距长度的增量，并用百分数表示。

关于本方法的精度和误差：该方法已使用许多年了，没有精度的规定，并且也不打算去作出精度的规定；该方法没有误差，因为对线的伸长柔软度的数值，只对这个试验方法被测定的结果而言。

(3) 国际标准化组织（ISO）技术报告 TR 4745 高电导率铜的螺旋伸长试验。国际标准化组织（ISO）亦推荐了高电导率铜的螺旋伸长试验法，可参见本章 8.5。

(4)“沃伦”（Olen SP850）螺旋伸长试验法。为了研究杂质对铜可退火性的影响，“Olen refinery”在 1995 年首先研究使用了螺旋伸长试验法（Spiral Elongation Test Method）。后来，其他公司也独立地开始了类似的研究工作，并也形成了不同的方法。欧洲标准化委员会（CEN）和它的技术委员会 133（TC133），亦已制定了一个新的欧洲标准——螺旋伸长试验法（欧洲标准 EN 133/02 铜和铜合金拉制杆标准（Copper and Copper Alloys Drawing stock）标准中已纳入螺旋伸长试验。这个方法现在称为 SEN（螺旋伸长数）—ISO 法，这个试验方法的步骤与“沃伦”Olen SP850 相比区别如图 3.2-41 所示。SP850 沃伦法具有长久的经验，所以“Olen refinery”法仍用作内部的标准，根据 40 多年来所获得的数据，沃伦法比 SEN—ISO 法更可靠，并在某种意义上对比较小的杂质变化更为灵敏，所以在杂质对热轧铜杆再结晶行为影响中仍使用 SP850 法作为测量的工具，以预示热轧杆的可退火性。

虽然 SP850 法测得的数值与 SEN—ISO 法测得的数值无对应的相关关系，但大致也可作一比较，例如“Contirod”法铜杆的 SP850 值（此处 SP 指螺旋伸长试验，850℃指退火温度）一般大于 300mm，这个数大致对应于 SP—ISO（700℃退火）值大于 400mm。

上述表征导体可退火性（退火性能）的几项专用试验方法，实际上已不仅应用于铜杆或型线，而且亦已延伸应用于圆铜线和圆铝线，只不过对退火圆铝线进行低应力伸长试验（LSE）时，对试件施加的应力为 55.2MPa。

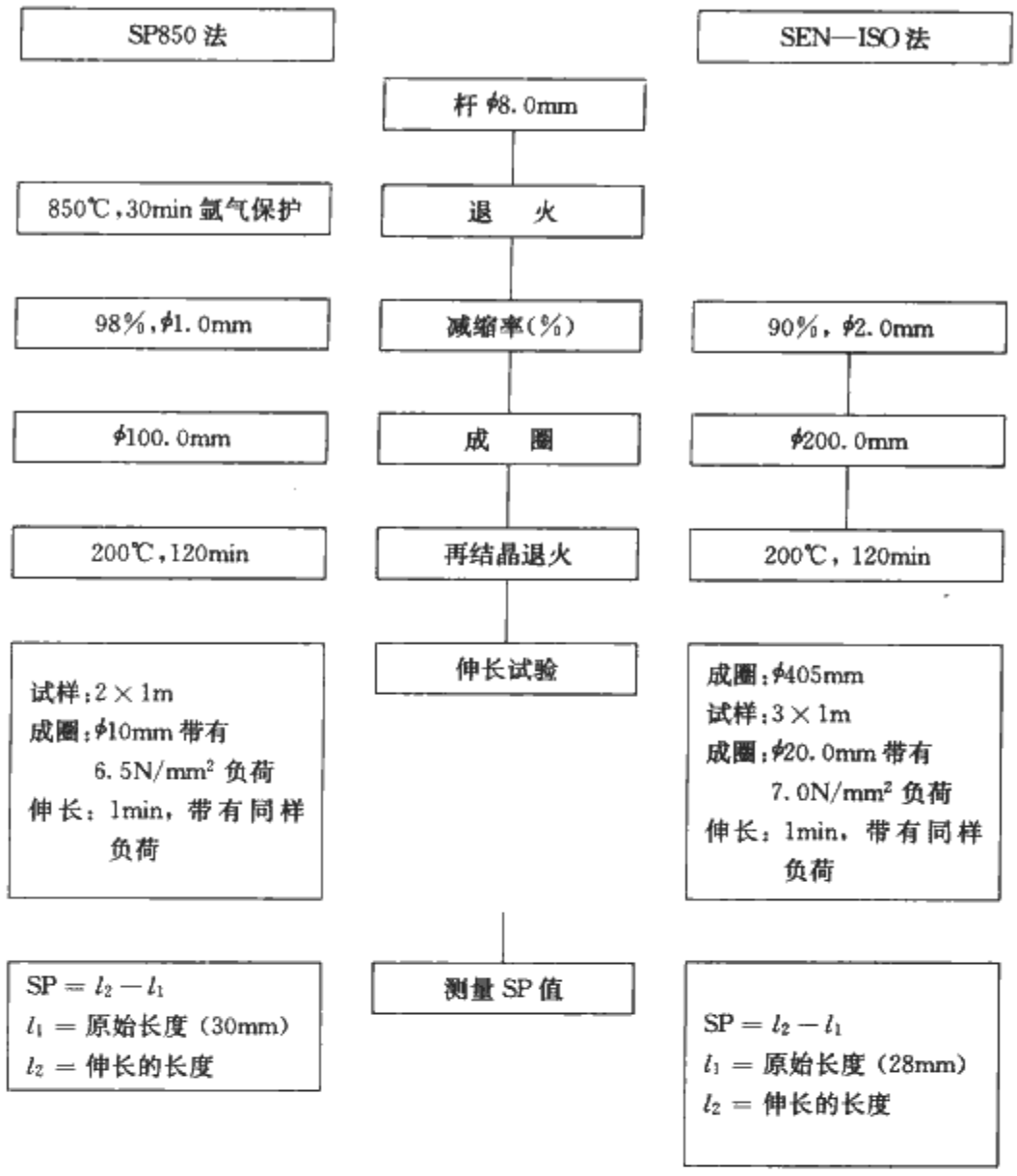


图 3.2-41 SP850(沃伦法)与 SEN—ISO 的比较

6.4 杂质对再结晶行为和断头率的影响

6.4.1 杂质对热轧韧铜杆再结晶行为的影响

Karel Feyaert 等曾用 99.999%高纯铜掺杂氧(200g/t)和含量极低的杂质元素 Ag、As、Bi、Pb、S、Sb、Se 和 Te,研究这些常见的低含量杂质对热轧铜杆再结晶温度的影响,从而用以预示杆的可退火性。图 3.2-42 为 Smart 于 1940 年的试验结果。图 3.2-43 为 Karel Feyaert 等的试验结果。由这些结果可以看出:

Ag:含量约在 9g/t 以下,没有明显的影响。

As:含量约在 4g/t 的水平下,对退火性能的影响才能检测出来。

Sb:含量约在 2g/t 以下,其影响可以忽略不计。

Pb:当含量达到一个很少的数值(g/t)时,就有小的影响。

S:当含量低到 2g/t 时,就有明显的影响。

Bi:是一个有害的元素,现在还没有足够的数据可用于监测整个的影响。

Se:含量即使低到 0.5g/t 的水平,还具有明显的影响。

Te:含量在 1g/t 以下,还具有明显的影响。

O_2:据 H. pops 和 J. Holloman 研究表明,随着含氧量的增加,则再结晶温度线性下降。

铜中的杂质对退火性能的影响已进行了不少的工作,但有关精确的相关模型尚待研究,按杂质对退火性能的影响,一般可分为四组:①无害的——Cr、Fe、Sn、P、Si;②较为有害的——Ag;③有害的——Pb、S、As、Sb;④严重的——Bi、Te、Se。

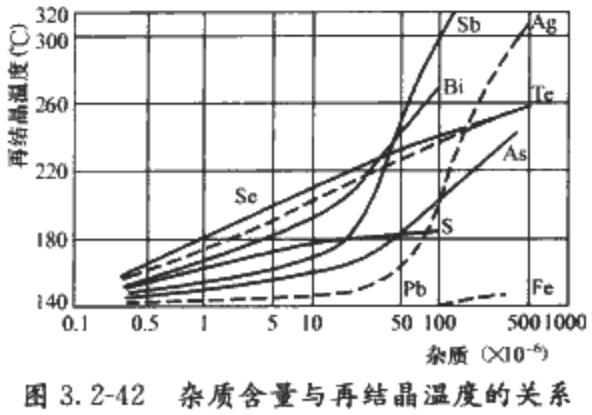


图 3.2-42 杂质含量与再结晶温度的关系
(1940 年 Smart 试验结果)

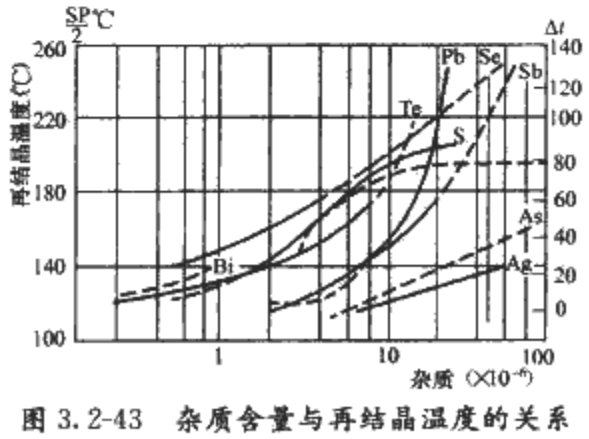


图 3.2-43 杂质含量与再结晶温度的关系
(1996 年 Karel 等的试验结果)

为了研究杂质对铜可退火性的影响，使用 SP850 法作为测量的工具，以预示热轧杆的可退火性。对工业生产的热轧铜杆的试样进行分析，可以看出不同牌号的铜，这些杂质元素对 SP850 是有影响的。图 3.2-44 示出了杂质对 SP850 的影响（该图是通过回归处理，提出单个元素的影响，而假定其他元素含量不变）。由图可以看出：Se、S、As、Pb 和 Sb 特别影响 SP850 值。

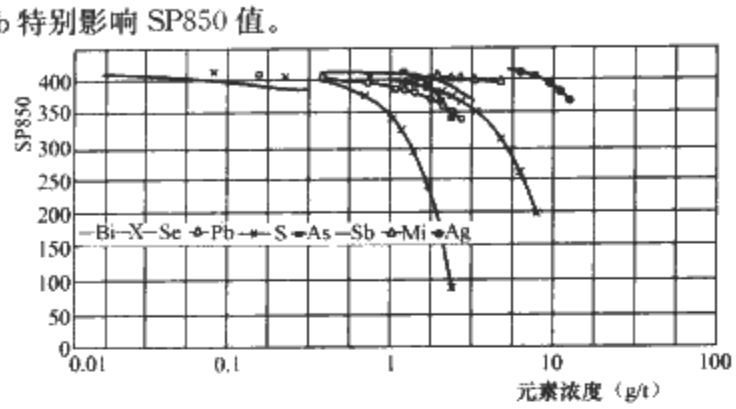


图 3.2-44 杂质对 SP850 的影响

Ag：含量约在 10g/t 以下，没有明显的影响。

As：含量约在 2～3g/t 和较高的水平下，对退火性能的影响才能检测出来。

Sb：含量约在 1.5g/t 以上，这个元素有影响。

Pb：即使含量约在 1g/t 下，这个元素对铜的再结日行为就有明显的影响。当 S 同时存在时，它们协同的影响亦可检测出来。

S：当含量低到 2g/t 时，就有明显的影响。

Bi：即使含量在 0.1g/t 的水平下，就立即影响铜的可退火性。

Se：该元素一旦存在，即使含量在 0.5g/t 以下的水平下，就立即影响铜的可退火性能。

Te：在不同牌号的阴极铜中很少存在，虽然对 SP850 的影响是推测的，但是明显的，在本研究不能作出详细的评估。

O_2：氧对 SP850 的影响如图 3.2-45 所示。可清楚地看出：较高的杂质含量，其影响是明显的。可以注意到，对所研究的铜杆，含氧量是不高于 300g/t 的，而其平均值为 185g/t。含量高于 250g/t 的数值是很少用于拉细线的。

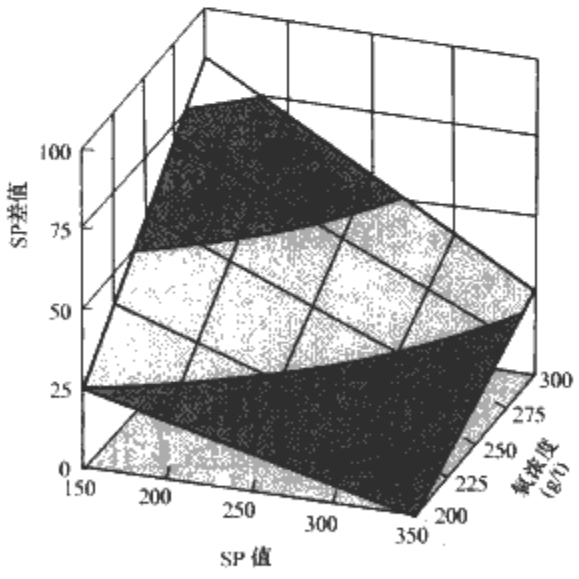


图 3.2-45 氧对 SP850 的影响

氧对再结晶行为的影响是铜本身纯度水平的一个复合函数。阴极铜材料纯度高 SP850 值亦高，从而可预示有的阴极铜的牌号适于拉细线，有的阴极铜牌号 SP850 值低，可预示不适合于拉细线。

6.4.2 氧含量对铜线再结晶行为的影响

一般认为：为了控制最终的性能或可拉性，在铜中添加少量的氧是一种有效的方法。已知氧可增加螺旋伸长数（SEN）、降低电导率、降低扭到断的扭转数，降低拉力和韧性。

为了深化研究，Horace Pops 和 James Holloman 曾用含氧量(10～1000)×10^{-6}的铜杆试样和如图 3.2-46 所示的工艺流程制备样品，以研究氧含量对铜线再结晶行为的影响。这个工作的目的，以期定量地深入了解退火工艺（过程）—组织与性能的关系、转变与时间的曲线关系。研究的跨度从无氧铜杆（Outokumpu 铜杆）到轮带式连铸连轧低氧韧铜杆（ETP 杆），并从再结晶温度、可退火性试验、退火性能、再结晶动力学和活化能 5 个方面，取得了数据。

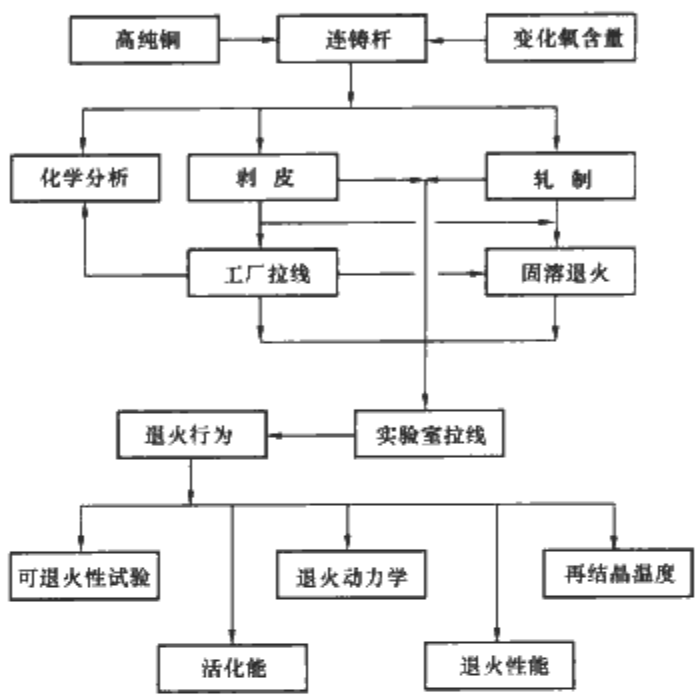


图 3.2-46 试样制备流程及测试项目

（1）再结晶温度。图 3.2-47 示出了典型的等时退火曲线（图中固定氧含量为 420×10^{-6}），绘制此曲线的方法是：把再结晶温度看作为一个退火温度，这退火温度是由拉制状态和完全退火状态之间的抗拉强度的中（间）值得来的。从而，它也可称为半-硬温度（$T_{1/2}$），并表示在 1h 退火后，在此温度下发生 50%的再结晶。

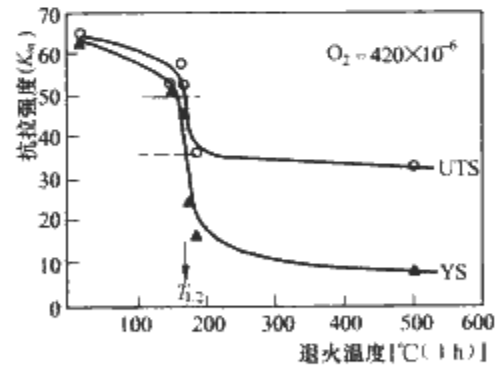


图 3.2-47 典型的等时退火曲线

$T_{1/2}$—半-硬再结晶温度

（退火 1h，面积减缩率 86%）

图 3.2-48 示出了在整个含氧量范围内的半—硬温度 $T_{1/2}$值，但固定面积减缩率为 86%，时间为 1h。

（2）可退火性试验。为了测量轧制杆的可退火性，采用硬度和螺旋伸长法进行试验。图 3.2-49 示出了含氧量对洛氏硬度（Rockwell）的影响，图中所有的杆都压扁到直径的 30%，并在 275℃下退火 15min。图 3.2-50 示出了含氧量对螺旋伸长数（SEN）的影响［把杆拉到 2.053mm

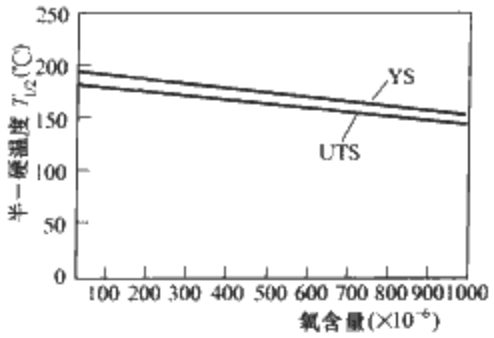


图 3.2-48 随含氧量再结晶半一硬温度的变化
(面积减缩率 86%，时间 1h)

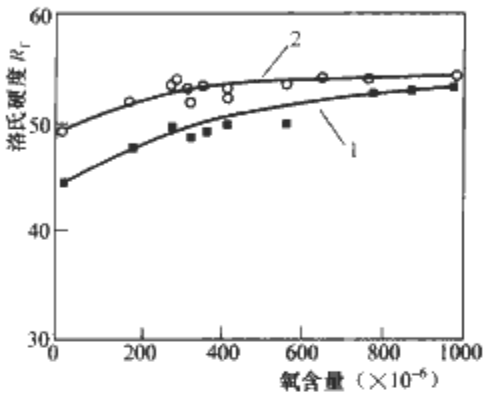


图 3.2-49 含氧量对洛氏硬度的影响
(所有杆都压扁到直径的 30%，并在 275℃下退火 15min)
1 - 在 700℃固溶退火；2—轧制杆

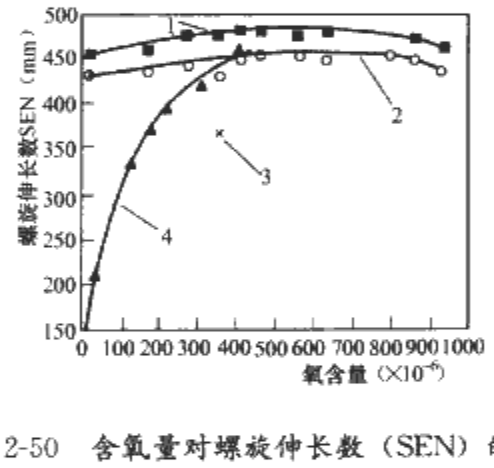


图 3.2-50 含氧量对螺旋伸长数 (SEN) 的影响
(杆拉到 2.053，并在 200℃下退火 2h)
1—固溶退火；2--轧制杆；3—高 Pb 和 Sn；
4—ISO/TC 26 数据

(12AWG)，并在 200℃下退火 2h]。

根据 ISO 资料，Se 和 Bi 的存在，对降低完全退火的铜的 SEN 值具有重要的作用。杆中含有小量 ($<14\times10^{-6}$) 的 Pb 和 Sn，对轧制杆的 SEN 值出现了不正常的低下，只有 363mm，在同样的含氧量下，比高纯铜低了 80mm。

通过试验可以看出：在 700℃下的预退火处理是有好处的，因为它促进了软化（有比较高的 SEN 值，这是因为增加了再结晶的晶粒尺寸）。

(3) 退火性能。铜线通常用于完全退火的状态，以达到高导电和柔韧性的最佳结合。此外，氧的含量、不同的工艺变化（如：退火间的面积减缩率、退火温度和晶粒尺寸）也属密切研考之列。图 3.2-51 示出了最终的退火温度对完全退火线机械性能的影响，图中所有的数据都基于面积减缩率为 65%，而含氧范围从 $(175\sim650)\times10^{-6}$。图 3.2-52 示出了含氧量 175×10^{-6}、358×10^{-6}、642×10^{-6} 的线，其典型的等温退火曲线，图中面积减缩率均为 65%。图 3.2-53 为含氧量对完全退火线机械性能的影响（图中面积减缩率为 86%），图中示出了 1.291mm (16AWG) 线含氧量对最终退火性能的整个影响，特别 LSE 值在电磁线中的应用是所有试验中最有用的，因为这个指标对氧的变化呈现出最敏感

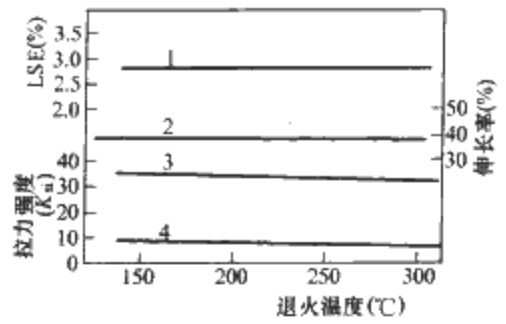
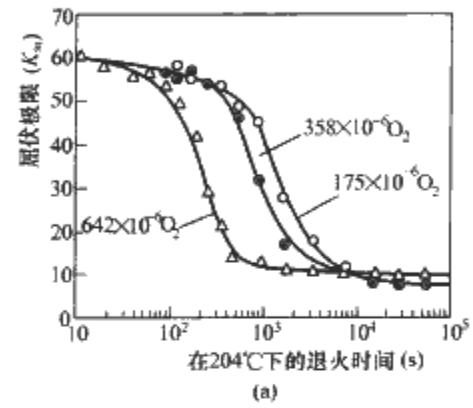


图 3.2-51 最终退火温度对完全退火线力学性能的影响
(在完全退火下的性能；面积减缩率 65%)
1—LSE；2—伸长率；3—抗拉强度；4—屈伏极限



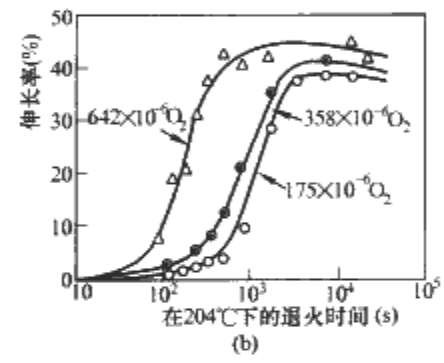


图 3.2-52 含氧量 175×10^{-6}、358、642×10^{-6} 的线，其典型的等温退火曲线
(a) 屈伏极限—时间关系（在 204℃下）；
(b) 伸长率—时间关系（在 204℃下）

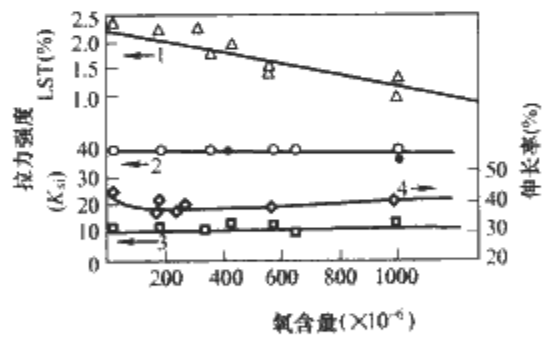


图 3.2-53 含氧量对完全退火线机械性能的影响（面积减缩率 86%）
1—低应力伸长值 LSE；2- 抗拉强度；
3—屈伏极限；4—伸长率

的响应。由图可以看出：随着氧含量的增加显示出稳定的下降趋势。图 3.2-54 为面积减缩率对完全退火线的机械性能的影响，所有的线在 260℃下退火 2h。在图 3.2-54 (a)、(b) 和 (c) 中分别示出了面积减缩率与低应力伸长 (LSE)、抗拉强度和屈伏极限以及伸长率的关系，可以看出：当退火前的面积减缩率超过 90%时，则 LSE 和伸长率急剧下降，而且对不同的含氧量，这些曲线大体的形状是相似的。在图中也可再次看到随着含氧量的变化，LSE是最

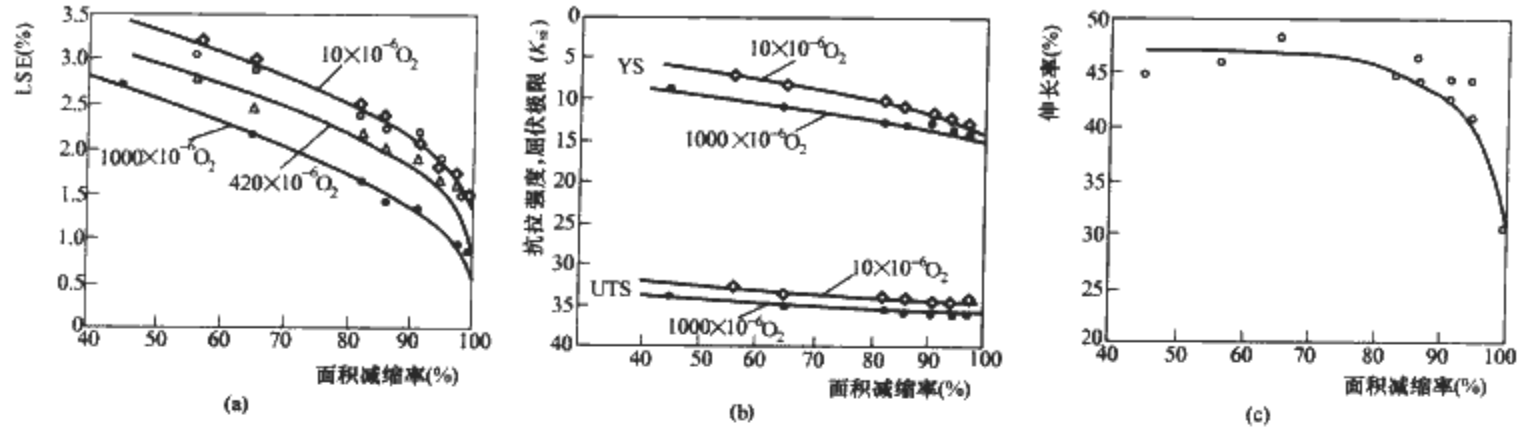


图 3.2-54 面积减缩率对完全退火线的机械性能的影响（所有的线在 260℃下，退火 2h）
（a）低应力伸长（LSE）；（b）抗拉强度（UTS）和屈和极限（YS）；（c）伸长率（%）

敏感的。为了有助于说明这些趋向，应注意测量完全退火线的平均晶粒尺寸，并绘制了图 3.2-55，图中所绘的面积减缩率是对应于线的直径的。可以十分清楚地看到：含氧量和冷加工引起晶粒尺寸的细化和稳定化。

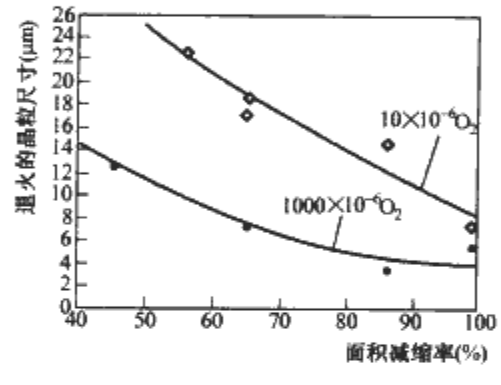


图 3.2-55 面积减缩率对退火线的晶粒尺寸的影响（在 260℃下退火 2h）

（4）晶粒组织与性能的关系。在前面已经指出：含氧量、先前的冷加工和高温预退火都影响完全退火线的晶粒尺寸和机械性能，也就是说机械性能可以通过改变最终退火的晶粒尺寸来加以控制。图 3.2-56 示出了先前的固溶退火温度对在盐槽可退火性试验后的硬度（在压扁的线上测得）的影响。由图中的结果可以看出：在整个含氧量范围内，硬度都是下降的，变化最大的是在最高的 860℃预退火温度下，而且硬度有的下降始于 500℃以上。对这些同样的样品，测定了晶粒的直径（见图 3.2-57），很清楚由于晶粒尺寸的增加硬度就下降，当温度超过 500℃时，晶粒尺寸就变得十分大了。图 3.2-58 示出了先前的固溶化温度对而后晶粒尺寸的影响，图中面积减缩率为 65%，含氧量为 175×10^{-6}。图 3.2-58（a）是 2.053mm 线在 260℃下退火 9min 的显微组织，也即在这点上刚好再结晶达到完成，图中双晶组织十分明显。

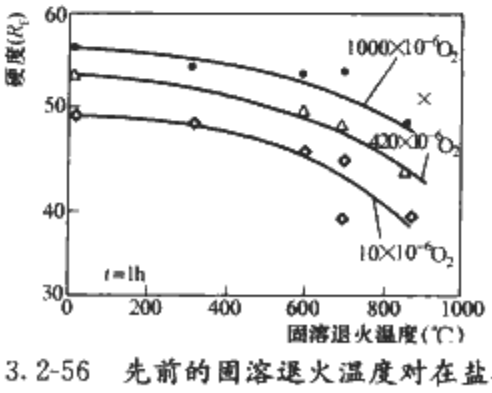


图 3.2-56 先前的固溶退火温度对在盐槽可退火性试验后的硬度的影响

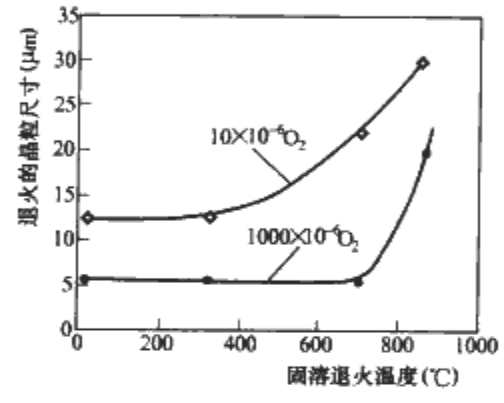


图 3.2-57 先前的固溶退火温度对在硬度可退火性试验后的晶粒尺寸的影响

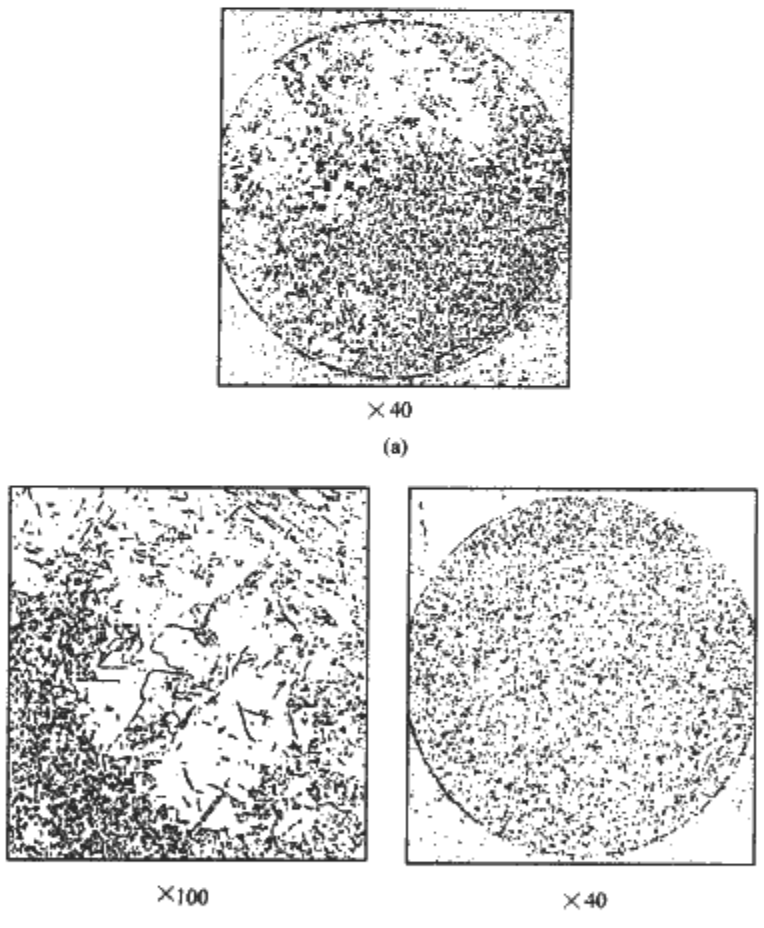


图 3.2-58 先前的固溶化温度对而后的晶粒尺寸的影响
（a）700℃固溶退火，9min 260℃完全退火；
（b）700℃固溶退火，2min 260℃退火，50%再结晶；
（c）325℃固溶退火，9min 260℃完全退火

综上所述，氧含量对铜线再结晶行为的影响大致可概括为以下：

（1）氧对加速退火进程起着有益的作用，从而可减少活

性能和退火时间，使再结晶温度稍有下降。

（2）由于铜氧化物粒子具有稳定化的作用，所以完全退火线的强度可通过增加含氧量、使用较大的先前的冷加工总量和减小晶粒尺寸来增加。

（3）二次再结晶（突然的晶粒粗化），在不同的加工履历下是可以发现的，这与在高温下预退火时氧化物的溶解有关。双晶的发现通常在500℃以上和含氧量在600×10^{-6}以下。在拉线前形成的粗晶，在以后的低温退火后是不会消除的。

（4）在拉线前的高温固溶退火可增加完全退火线的柔软性（度），对这种软化归因于原始晶粒尺寸的增加。

（5）为了预示铜杆的退火行为，螺旋伸长试验比硬度可退火性试验更为敏感。杂质Bi和Se降低螺旋伸长数(SEN)。小量的Pb和Sn降低轧制杆的SEN值，通过先前的高温固溶退火，可消除硬化的影响，这可能与形成了铅和锡的氧化物有关。

（6）完全退火线的性能不受最终退火温度的影响。

（7）整个机械性能，低应力伸长显示退火响应是最缓慢的（惰性的）。

6.4.3 含氧量对拉线断头率的影响

有关含氧量对拉线断头率的影响，Yea-Yang Su作了研究。对直径0.4mm的铜线，据大量统计表明：拉线断头率与氧含量有“V”曲线的关系（见图3.2-59），含氧约在380×10^{-6}时，线的断头率最低。在氧含量较高时，由于Cu_2O的大量存在，是招致断线的原因。

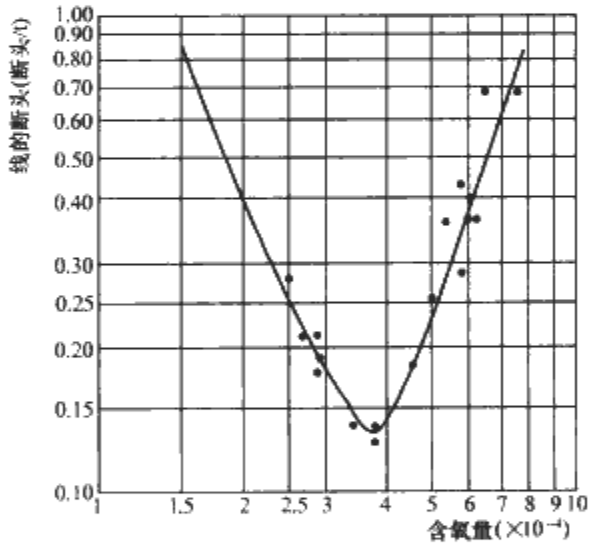


图3.2-59 铜线拉线断头率与含氧量的关系（铜线直径0.4mm）

6.5 铜杆的质量监控

高质量铜杆在制线生产中应满足下列要求和测试：

（1）适于现代高性能多根出线拉线机的应用。

（2）适于高速拉线生产。

（3）能满足细线、微细线和超微细线在高科技（如电子、通信、机器人、汽车、医疗、音响等）上的应用。

（4）适于各种尺寸电磁线和型线的生产。

对铜杆的质量监控（特别是低氧铜杆）包括在线上的和成品杆上的取样监测。

（1）直径——可用激光测量仪，连续监测。

（2）扭转试验——10次左向和10次右向扭转，可获得铜杆表面质量的信息，表面质量与浇铸和连轧的控制直接相关，从而可获得连铸连轧参数的信息。

（3）扭转到断试验——由一个方向一直扭到破坏、反向扭到破坏和其他方式的扭转试验被制杆厂或用户广泛应用。由于与性能没有确定的关系以及解释的主观性，这些试验仅被用作内部控制工艺指标的方法而已，所以在ASTM B49电工用拉制铜杆标准中未作标准化的试验给予推荐。这个试验可以证实金属的韧性。

（4）抗拉强度和伸长率试验——属常规检验项目。

（5）表面残留氧化物试验——用还原法测定表面氧化物的厚度，在ASTM B49中有明确的规定。这个试验其目的是要控制铜杆清洗操作的效率。

（6）铜杆成品表面的监控——采用在线连续涡流探伤，监控表面缺陷，用磁性探伤仪监控铁夹杂。这些试验有助于直接了解在当前生产状况下杆的质量。

（7）含氧量控制——在铜液中可用氧电池(Concelox®）连续测量出来。在每捆成品杆上取样，可用Leco测氧仪测定。

（8）化学分析——在每8捆杆上用发射光谱仪执行一次全分析，对A级铜至少分析11个元素，其典型值如表3.2-42所示。

表3.2-42 A级铜控制质量典型的分析结果

元素	As	Sb	Sn	Ni	Fe	Pb	Bi	Ag	S	Se	Te
含量($\times10^{-6}$)	<2	<1	<1	<2	<3	<3	<0.2	<10	<4	<0.3	<0.1

（9）电导率——属常规检验项目。

（10）螺旋伸长试验——见本章6.3.2。

（11）杆的显微镜控制——每天一次，取一个样，制备横截面，用显微镜检验，在放大500倍下，对裂纹的数量和深度以及在杆中皮下的Cu_2O夹杂进行观察、计数和测量。在同横截面上，可测定晶粒的尺寸（放大150倍），用标准晶粒尺寸图相对照，并进行全面评估大致的杆表面的光滑度。

（12）氢脆试验——仅对无氧铜杆而言，在ASMT B49和ISO 2626（铜—氢脆试验）标准（见本章8.2）中均有明确规定。

（13）低应力伸长试验（LSE）——见本章6.3.2。

（14）硬度试验——用硬度试验表示退火性能，见本章6.3.2。

（15）无氧铜氧化膜黏附性试验——在ISO 4746标准中有明确规定（见本章8.3）。本试验适用于评定用于电子器件、玻璃与金属封接以及其他依靠形成氧化铜黏附膜等用途用的无氧铜。

（16）平均晶粒度测定——ISO 2624平均晶粒度测定法，见本章8.4。本方法适用于测定由单一相组成的铜和铜合金材料，以了解退火再结晶的程度（不完全再结晶、完全再结晶，甚至过结晶），并结合其他性能的测定，以达控制和改善退火工艺的目的。

（17）硝酸亚汞试验——主要适用于铜合金，如黄铜、锡青铜挤制品和拉制品。由于多数铜合金对应力破裂都有不同程度的敏感性，因此，各国都很重视铜加工产品在出厂前的消除内应力。ISO196加工铜和铜合金——残余应力测定—硝酸亚汞试验标准中有明确规定，见本章8.1。

6.6 铜拉线润滑剂及其系统的正确使用

在拉线生产中，润滑剂的重要性都知道，而且对润滑剂的配方很关心，都说保密或专利，但事实上我国的拉线机设计和制造者对润滑系统不重视，也缺乏研究，再加上制线厂对润滑系统缺乏技术管理，往往使为保持润滑系统正常工作

状态的技术参数失控，从而在拉线生产中得不到良好的技术经济效果。

6.6.1 铜拉线润滑剂

不管多么保密，传统的铜拉线润滑剂——乳化液一般都有下列组分组成：

矿物油：10%～50%。

脂肪油：10%～50%。

硫酸盐化脂肪油和石油磺酸盐：5%～20%。

脂肪酸皂：5%～20%。

脂肪酸的聚乙烯乙二醇脂：5%～20%。

除了这些主要组分之外，通常还有其他的添加剂，如稳定剂、溶解剂、杀菌剂、防腐剂、防锈剂和消泡剂。

在许多铜拉丝润滑剂中，矿物油是基体。矿物油的突出优点，除了价格低和良好的润滑作用外，是其抗氧化作用。纯或改性脂肪油是极好的润滑剂，对拉丝模和鼓轮来说，它的减摩擦性是很有效的。但是，天然脂肪油分子存在不稳定双键，所以为了防氧化，须稳定处理。有机的硫酸盐和磺酸盐用作矿物油和脂肪油的常规乳化剂。脂肪酸皂具有双重作用，一方面它们是良好的乳化剂，另一方面它们具有突出的拉线性能。脂肪酸的聚乙烯乙二醇酯是非离子乳化剂，其主要功能是稳定乳浊液，特别是在盐存在情况下。

上述组分，除矿物油外，大多数有很大缺点，不管其预期性能如何，它们在拉线中都趋向于生成不溶性铜皂。

在铜拉线情况下，由于摩擦化学反应主要发生在拉线模中，在模子中可产生高温和表面接触，结果形成极憎水的铜皂，完全不溶于水，对金属表面具有很强的亲和力。在水体系中极难稳定这些反应，铜皂与铜粉形成的黏性渣泥沉积在所有机器部件上。憎水皂部分漂在乳浊液表面，产生难于除去的脂肪泡沫。最后，形成的黏性沉积物在拉丝塔轮和模子上，造成线和/或弄脏线表面而引起破裂。原皂浓度减少，削弱了乳化性能，缩短机器的使用寿命。因此，研究取代形成不溶性铜皂的组分的方法是有前途的。长期以来，在超细线生产中，曾使用低浓度可溶性硬脂酸钠，并取得了效果，如不发生泡沫问题，不形成黏性渣泥。但这种方法，不适于在大拉机上使用，因为大拉线温高，在硬脂酸铜的熔点之上，再会形成黏性薄膜。

试验已表明，某些分子量适当的合成羧酸形成易溶于水的铜皂。这些新型铜皂不呈现与水溶液分离或沉积在金属表面的倾向。然而，由于这些特殊的合成羧酸强烈的亲和性和低乳化性，它们不能混入经典的铜拉线润滑剂中。

氧化乙烯/氧化丙烯类高分子共聚物作为优秀的润滑剂已为人熟知。特别这些化合物具有两种性能：在拉线模的温度下，它们不溶于水，且有良好的润滑性；另一方面，在相当于拉丝模外面的温度以下，它们则完全溶于水中，同时对金属表面有清洁作用。

将这些共聚物与上述合成羧酸混合，成功地开发成的拉线润滑剂就具有所规定的各项性能。几年来，在超细线拉线中，已得到如下结果：拉丝模寿命大大提高；线断头率显著减少；机器清洁；改善线的表面质量；乳化液寿命增加 2～3 倍；不生成铜泥。

在拉细线中使用这类配方得到成功的实际经验，再加上新型合成的非离子防摩擦添加剂，这种新的铜拉线润滑剂现已引入拉中等线和粗线之中，而且已进入深入系统的开发工作。

防止不溶性铜皂生成的进一步解决办法是配置无皂、脂肪油或硫酸盐化脂肪油的铜拉线润滑剂。基于经典的方法，矿物油对氧化稳定，凭使用合成的阴离子或非离子乳化剂和无羧酸基团的极性有机润滑改良剂，在使用这类乳化液配方于聚晶钻石拉线模和陶瓷轮的多根出线拉线机上的实际经验中，已得到良好的结果，未看到在拉线塔轮、拉线模或机器部件上有铜粉沉积。铜粉可与乳化液一起排出，并与黏性渣泥分开。在生产线上拉出的线，很清洁和光滑，特别是由于完全除去了拉线润滑剂的残留物，因此退火线绝对不会产生问题。

综上可以看出，一种新的成功的铜拉线乳化液，不仅要关注配方、适用性（细拉、中拉和大拉）、减少或消除黏性渣泥，而且还要关注使用寿命和经济处理废液问题。

鞍山科技大学化学工程学院研究和研制的铜拉线润滑剂的配方、配制方法和提出的水基铜拉线润滑液暂行技术指标（见表 3.2-43），可供润滑剂设计和制造者以及拉线厂对比交流。

表 3.2-43 水基铜拉线润滑液暂行技术指标

项 目	技术指标	试验方法
浓缩液外观	橙色半透明	目测
储存稳定性	通过	目测(无沉淀、无分层)
5%稀释液 pH 值	8～10	SH 0365—92
乳液稳定性	—	SH 0365—92
皂	无	—
油	无	—
防锈性试验[(35+2)℃]	—	SH 0365—92
铜片 24h	A	—
腐蚀试验[(55+2)℃]	—	SH 0365—92
铜片 4h	A	—
铜粉	A	—
消泡性(mL/10min)	≤2	SH 0365—92
4 球试验 P_B/N	≥500	SH 0365—92
水质适应性(水硬度≤500μg/g)	透明及半透明	目测

(1) 乳化液的配方。

7 号机油（工业级）：25.0%。

油酸三乙醇胺（工业级）：28%。

石油磺酸钠（工业级）：10.0%。

土耳其红油（化学纯）：4.0%。

聚乙烯基丁基醚（化学纯）：3.5%。

抗磨剂（化学纯）：0.6%。

消泡剂（二甲基硅酮油，化学纯）：0.1%。

杀菌剂（三丹油，化学纯）：0.1%。

防锈剂（苯骈三氮唑，化学纯）：0.1%。

水。

(2) 配制方法。润滑液由油、水、表面活性剂、表面活性助剂等组成，选择两相混合法制备。将阴离子表面活性剂、水溶性防锈剂、表面活性剂助剂溶于水相中，极压剂、油性剂溶于油相中，边搅拌边将油相滴加到水相中，再加非离子表面活性剂搅拌至透明后，加杀菌剂、消泡剂充分搅拌即可得到水基拉线润滑液的浓缩液。

(3) 水基铜拉线润滑液暂行技术指标（见表 3.2-43）。

6.6.2 润滑剂系统的正确使用

对铜拉线润滑剂的维护，控制系统的技术参数，切实执行技术管理，以获得最佳的拉线工作状况具有重要的作用。

（1）润滑系统的清洁度。首先要考虑的是槽子（容器）在使用前系统的清洗。如果系统是新的，先要清除制线厂带来的土。如果系统是在用的，那么老的铜屑（粉）、油和反应的皂必须除去。典型的清洗过程，先用化学清洗剂除去土和来自槽子、机器和管子表面的油。

化学清洗剂可直接加入乳化液，不需中断系统操作，一般在放空系统以前使用8～12h。紧接着进行物理清洗，除去机器中和槽中残留的土。槽子和机器用压力冲洗，这是最后的措施，如系统不洗净，这些残留的铜屑和油可从一开始就污染新的拉线润滑液。

（2）水的质量。水质可对乳化液产生剧烈的影响。大多数用于有色金属拉线的水成润滑系统含有最少90%的水，在水中的杂质可影响乳化液的稳定性，构成潜在的腐蚀、细菌的生长和影响润滑的效果。目前有四种主要型式的水在工业中使用。

城市水，典型的有最高的硬度和盐。

软水，是由钠离子取代钙离子和镁离子生产出来的。软水降低了硬度，但溶解的盐量没有改变，从而腐蚀成为较大的问题，因为钠盐比钙或镁盐更具腐蚀性。

去离子水，通过吸附作用除去了所有的离子。把这些离子除去促进了乳化液较好的稳定性和腐蚀保护。

反渗透水（Reverse Osmosis Water），是用于乳化液使用“最”清洁的水。它除去了固体、盐和离子，使用这种水对维护乳化液的工作质量是非常好的。

（3）系统开始工作。在启用系统时要注意启用程序。在系统中先加水，加新鲜水时，在加入铜润滑剂以前水温最理想的是达到工厂的环境温度。当水至少加到80%时，润滑剂加入槽中。润滑剂要慢慢地加入湍流的部分，并启动循环泵，以保证充分的混合。如果使用介质过滤系统，过滤纸应从系统中除去，直到溶液达到规定的目标操作温度。

（4）系统的操作参数。

1）温度：大多数铜拉线润滑剂被设计在28～48℃下运行。在这个范围内具有最佳的净化（去垢）力和机器的清洁度。如果运行在高温下，铜皂的形成速度增加，由此缩短槽子（润滑液）的寿命。在低温下，系统的净化力降低，并倾向于形成（增加）泡沫。这种泡沫可招致铜板腐蚀。

2）流量/压力：为了尽量减少润滑液的浪费，推荐为$(7.6\times10^{-5}m^3/s)$/735W。对老的拉线机压力范围137.8～206.7kPa（20～30PSi），在较新的多根出线拉线机中，通常压力大于275.6kPa（40PSi）。这些压力是特定地施加到喷射供应设备的，而浸没牵引轮的机器典型地具有的压力为或低于68.9kPa（10PSi）。之所以要有这样的流量和压力，目的是要足够地除去模子口和牵引轮上的铜屑（粉）。由此，可获得一个清洁的拉线系统，可延长模子寿命和操作时间。

3）浓度（总的脂肪量）：脂肪的浓度可用两个不同的方法测定——总的脂肪量（Total Fatty Matter，TFM）和折射指数（Refractive Index）。TFM可用油和水相分开的办法测定，对油、水相的分离可用化学分离试验法。TFM可用于确定在乳化液中润滑组分的浓度。在工厂条件下，采用折射指数法是非常普遍的，该法试验快、且容易。在乳化液中的盐和其他固体物质都不是润滑系统的组成部分，它们可影响光的折射，这能导致影响读数的精确度。含脂量可用手持式折光仪WYT—15型测定。对已知的拉线机和生产的线的规格范围，其浓度应由润滑剂供应厂推荐，并维持在应有的水平下。

4）pH值：pH值是润滑剂的酸度或碱度的测量值，为了控制润滑性、净化力和起泡沫性，大多数金属加工的流体都属碱性的，以防设备腐蚀。对拉线乳化液，典型的pH值范围为8.0～9.0。pH值超过9.5的乳化液有助于增加净化力，但降低润滑性，这可导致起泡沫和由于润滑不良而导致断线。pH值小于7.5的润滑剂将很快地形成铜皂（由于油和铜屑之间的反应）。这样促进了油分离、弄脏机器和降低过滤。对pH值调整的方法应有所选择，并与供应厂协商。例如，若pH值偏低，则可用氢氧化钠溶液进行调整，一般为每吨润滑液用150g氢氧化钠，加入时可采用50%的量，逐步加入、逐步测量，待pH值符合要求为止。

5）细菌：如不控制细菌，则影响润滑剂的乳化作用系统。这可引起乳化液的油组分分离，由此影响机器性能和缩短槽子（润滑油）的寿命。另外，细菌可以降低乳化液的pH值、腐蚀设备、阻塞过滤器和使铜线变色。细菌可用杀菌剂得到迅速的控制。使用杀菌剂可以减轻润滑系统的污染，但仅仅在细菌污染存在时才用。定期地添加杀菌剂是不可取的，因为可导致细菌菌株（种）对给定的杀菌剂产生免疫性。

6）电导率：电导率是对乳化液中离子和经常含有组分的量度。在乳化液的使用期内，一般电导率是增加的。对电导率增加起作用的因素是来自使用水的盐和铜屑（粉），如果配乳化液用的是硬水，则水蒸发了，但盐的含量继续增加。这样会使电导率增加，并可招致乳化液不稳定和设备腐蚀。电导率大的变化可显示出系统的老化率。

7）总铜量：总铜量是对乳化液中铜的量度，它可用原子吸收或ICP法测定。百万分之几的含量，它代表的是悬浮的金属铜和可溶解的/不可溶解的铜复合物（这种复合物是与润滑剂反应形成的）。这个参数亦可用于确定一个润滑系统的老化率。经过适当过滤的乳化液，其总铜量可处于相对低的水平，从而优化了工作质量。总铜量水平大的变化可以显示过滤、模子“剥皮”或线在导向或导轮上磨损存在的问题。

（5）过滤。为了改善拉线乳化液的清洁度和稳定性，推荐对乳化液采取切实的过滤措施。有效的过滤可降低在乳化液中铜屑的总量，从而防止机器弄脏和可溶解的、不可溶解的铜皂的产生。这将改善拉线的工作质量和延长润滑液的寿命。有许多过滤的方法可以采用，在这些方法中最普遍使用的有采用档板的槽子、牵引链和纸过滤。在润滑系统具有足够的尺寸时，最有效的系统已证实是在槽子的底部用与过滤纸相结合的牵引链。对这个应用，过滤介质的选择是系统专用的。许多不同材料和重量的纸都可使用，这取决于流量、粒子的尺寸和过滤器的设计。

（6）系统的尺寸。拉线乳化液槽子的容量对过滤和稳定性有巨大的影响。要有足够的流体体积是很重要的，以允许有时间有效地除去屑子。如果槽子尺寸小了，将使循环太快，不允许有足够的驻留时间去沉淀和过滤。另外，在模子上产生的高压和热量会引起乳化液进入一个“受控不稳定”和“掺气”的状态。所以在拉线机和泵外部的无用时间里要允许润滑液回到它的稳定状态。

足够的槽子容量，典型地可作如下估算，即按使用$(7.6\times10^{-5}m^3/s)$/735W估算，润滑液每循环一次的最少时间按10min考虑。例如，每台具有20×735W的10台拉线机，那么总的功率为200×735W，应需要9100dm^3的槽子容量。当然，亦应考虑给定的铜的总生产量。总生产量取决于拉线机的数量和机器的速度。没有足够的体积使得对温度的控制更加困难，并且降低乳化液的稳定性和抑制了过滤。在确定

一个系统的尺寸时，上述的准则应该使用，而且要考虑将来增加设备的可能性，所以最好要超过开始时的容量。

(7) 系统的维护。对乳化液进行定期的试验和维护是最有效的措施，这样，可延长槽子（润滑液）的寿命。建议 pH 值、TFM、温度和压力要每天检查。调整应该进行，但应采取小量、定期添加的办法，以保证达到稳定的水平，而不是浓度（脂肪）和 pH 值有大的尖峰信号。对润滑剂的添加使用带有自动计量装置的系统对维护整个系统平衡是非常有效的。在添加时应使系统产生高度搅动，以保证具有足够的混合。细菌、电导率和总铜量应每月监测。

鉴于还有其他的许多因素——如模子质量、穿模对中、铜杆质量和牵引轮状态等都可影响拉线的工作质量，但上列各点能有助于保证拉线润滑液运行在优化的技术参数下。

6.7 制线装备的发展

为了提高制线生产的生产效率和经济效果，制线装备的发展具有重要的作用。制线装备的发展与导体原材料、制杆、制线工艺和模具、润滑、过滤等辅助系统的发展密切相关，可以说是相辅相成、互相促进。我国制线装备的总体水平与国际先进水平相比，在设计创新、制造工艺和控制系统等主要方面尚有相当差距。几十年来制线装备一直在沿着高效、高品质、多工序组合一条龙生产和实用化的总方向发展，并已取得了不少的进展和成果。

6.7.1 制线装备的高效化

(1) 高速拉线——国内开发的小拉机的最高速度已达 53m/s (3200m/min)，在生产 0.12～0.21mm 的铜线时，连续生产速度可达 45m/s (2700m/min)，以 8h 班产计算可达 130～395kg，比传统国产机型的效率提高了 60%～90%。

(2) 多根出线拉线机（多头拉线机）——多头拉线有许多优点：如一机多根出线（现在最多的已达 40 根）；拉出的线机械电气性能均一；与单根出线拉线机相比性能价格比优越得多，在相同产量下投资费用约低 40%，单位产量用电量大为减少；可单盘收多根线，在下工序中又可单盘放出多根线，由此减少放线设备和盘具投资；采用后减式换模，可达到快速换模的目的，简化维护和操作，减少换模辅助时间，节约生产成本；减少占地空间，特别适合于多工序组合一条龙生产。多头拉线机的缺点：如受铜杆和操作影响较大，一根断线影响其他；用于生产单根线时，头数多的优点并不突出。因此，不是所有用户都适用，多头拉线机用于要求多股导线产品的场合，如汽车线、仪表线、电子设备用线等。

(3) 多工序组合一条龙生产——把几个生产工序组合在一起，可简化操作步骤，改善占地空间，增加生产线功能和提高质量水平，在这些生产线中多头拉线机可发挥非常有效的作用。例如：汽车用线生产线：拉线—绞（束）线—绝缘；通信电缆生产线：拉线—退火—挤出；建筑用线生产线：拉线—挤出—SZ 绞—护套；电磁线生产线：拉线—涂漆。

6.7.2 制线装备的高品质化

(1) 无滑动大拉机——所谓“无滑动”指的是被拉的铜线在每级的拉线轮上都无滑动，铜线与拉线轮的圆周速度完全同步。由此有利于提高铜线的表面质量。此外，还有其他的优点，如低耗节能，可节约用电 20%。无滑动大拉机，实际上也就是快速换模拉线机，不同之处就是其每级拉线轮之间的面积压缩率可以调节，非常灵活，具有快速换模拉线机的优点；设备简化了机械结构，由于减少了滑动，提高了拉线轮的寿命。

(2) 感应加热连续退火——与电阻接触式连续退火相比，可获得较高的线的表面质量；设备传动简单，连续退火无须预热，产品所经导轮少；线的连续退火的质量受线材本身质量的影响小，电阻接触式连续退火要利用线材在各接触轮之间构成电路，所以线材本身的电阻率的大小和均匀性都会对退火电气回路产生影响，从而影响到线材的退火质量（伸长率波动）。

(3) 等离子体加热连续退火——是今后退火方式的一种发展方向，特别适用于漆包线生产。这种方式的优点是在退火过程中等离子体能消除线材表面的毛刺等缺陷，可获得甚至比感应加热退火方式更高的线材的表面质量。

6.7.3 制线装备实用化

(1) 快速换模拉线机——拉线轮和牵引定速轮采用各自独立的电机驱动，更换线规格时，只需更换定径模，将线直接从相应模具引入定径模，只须一套模具就可完成多种线规格的生产。由于该种拉线机不用考虑模具的问题，设计时可选择更合理的延伸系数，进线通常采用较大的延伸系数，出线则采用较小的延伸系数。这种设计可扩大进、出线的适用范围。现在，这种设计已扩大到中拉、小拉，甚至微拉机。快速换模拉线机的优点在于：高效低耗，小拉机的进线规格只需大拉的规格，减少了中间规格线的库存，更换导线规格只需更换定径模，减小了拉线模的库存；高品质，由于拉线配模的面积压缩率得到优化，减少了铜粉的产生，提高了线的表面质量。

(2) 大容量收线——线材制造者往往希望采用较大的收线盘。在国外，喜欢使用的直径 630mm 大容量线盘，一盘线达 700～800kg，一些规格可能要开一整天才更换一次线盘。有时会看到几十台机器在生产而见不到一个生产工人。从提高效率而言，开发大容量收线机也是发展方向之一。小拉机采用大容量收线，最大可使用 PND630 的锥形高速拉线线盘，装盘容量比传统的机型提高 5～10 倍，由于使用了锥型高速拉线线盘可避免线材重复压线现象，有效地提高了下道工序的放线质量。

(3) 采用工业微机或人机界面进行显示控制——可以实现自动控制，动态模拟显示，具有故障显示，自动配模和校验配模等功能。大大简化操作和维护，使用更方便、轻松。

(4) 拉线模——拉线模的材料，已有碳化钨硬质合金、单晶天然钻石、单晶人造钻石及聚晶钻石；制模的技术，已开发了模具的计算软件、硬质合金模的表面处理、金刚石薄膜及镀层；关于拉线模的计算机模拟可用来分析在拉线过程中金属的二维变形，提供加工过程中关于材料和热变形的数据。

(5) 拉线润滑剂—— 一直致力于提高拉线生产的工作质量、增加模具寿命和自身的使用寿命、减少断线率以及注意烟雾控制和环境保护。

(6) 激光扫描外径测量仪——由“Beta Lasermike”公司生产的激光扫描外径测量仪，是专门为拉线生产线设计的，能承受生产现场的污染。对线材的在线外径测量有单侧与双侧两种系统，其测量的精确度已达到了 1μm 以下。

7 铜导体的制品及其应用

铜在电气工业中是广泛应用的材料，作为铜导体的制品形式有单线、绞（束）线、型线（实心和空心）、带材、薄带状线和编织线等。它们主要起着传导电能或传送信息（声音、数字和图像）或屏蔽的作用。

7.1 铜排在母线槽上的应用

母线槽由铜排或铝排等组件构成。它在宾馆高层建筑、现代化工厂和展览会场等场合获得广泛的应用。图 3.2-60 为母线槽的举例。它主要用作供配电的主干线，可把大电流直接送至用电点。它的品种有空气型母线槽、密集型母线槽、大距离母线槽、户外型母线槽和耐火型母线槽。母线槽的母排材料可用铜或铝，但以铜为多。在铝母排用作母线槽的导体时铝排表面必须镀锌或镀银处理。母线槽的功能与电缆是相同的，按理亦应以截面来表示规格的大小，但现在国内外母线槽的规格都用额定工作电流来表示，这时应注意同样截面的母线槽在不同环境下，其允许通过的电流是不同的。考虑到经济截面，相同的工作电流所选的母排截面也是不同的。母线槽的额定工作电流（A）可分为下列规格，即 200，400，600（630），800，1000，1250，1600，2000，2500，3000，4000，5000。为满足上列电流的要求，电工用铜排的生产范围如下：厚度 3～20mm；最大长度 12.5m，一般标准长度为 6m，有时需要 9m 及以上的长度；宽度 10～280mm。根据额定工作电流，虽然没有规定铜母排的截面等级，但在表 3.2-44 中大致也有电流与铜母排总截面相应的对照关系可供选用参考。

铜母排可用水平连铸—轧制—拉制法、半连续浇铸—轧制—拉制法、上引连铸—轧制—拉制法、连续挤压—拉制法等方法制造，但不推荐浇铸锭坯—热轧—拉制法生产，该法铜耗大，污染环境，已被淘汰使用。

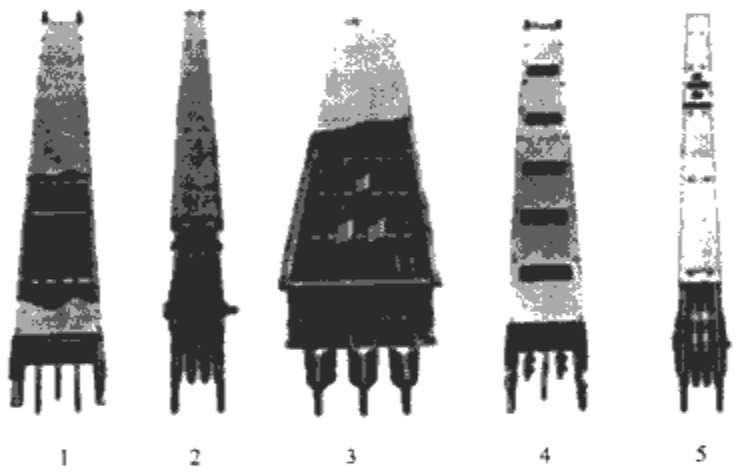


图 3.2-60 母线槽举例

1、3、4—裸导体母线槽；2、5—绝缘母线槽

表 3.2-44 铜母排总截面与额定工作电流的关系

额定工作电流(A)	铜母排规格(mm)	额定工作电流(A)	铜母排规格(mm)
100	3×15	1000	6×80(75)
160	3×20	1250	6×100(90)
200	3×25	1600	6×125
250	3×30	2000	6×175
315	3×40	2500	6×230
400	3×50	2500	2根×6×105
500	3×60	3000	2根×6×140
630	6×40(不打孔)	3500	2根×6×175
630	3×80(打孔)	4000	3根×6×140
800	6×60(50)	5000	3根×6×175

7.2 铜（铜合金、铜—钢、铜—铝、钢—铝）导体在接触导线（电车线）上的应用

随着我国经济的快速增长，电气化铁路总里程的增加、速度的提高以及城市轨道交通的发展，接触导线已成为研发和生产的热点。接触导线最早用于铁路、矿山、市内交通和工厂内部的电气化运输系统，现在又扩展到了在城市轨道交通和磁悬浮铁路机车供电上的应用。接触线的材料最早用的铜（现在还用），后来随着车速的提高又发展了铜合金（镉铜、青铜、锡铜、银铜、镁铜等）和双金属（钢—铝、铜—钢、铜—铝）接触导线。根据速度和载重量的不同，接触导线的截面等级一般在 80(85)～150mm²。现在，高速电气化铁路用的银铜接触导线（120mm²）已获得广泛的应用。

接触导线是目前研发和生产的热点，故对此内容稍加展开：

（1）无氧铜杆连续挤压法制造接触导线是一项新工艺，它主要的优点和特点在于：

1）改变了无氧铜连铸杆坯的粗晶组织（这是无氧铜连铸杆组织的特点，而不是它的缺点），具有较好的细晶组织，晶粒分布均匀。

2）银铜接触导线的性能有所改善（见表 3.2-45）。

表 3.2-45 用无氧铜杆连续挤压拉制法生产的银铜导线的主要性能

工艺 \ 性能	20℃电导率 (%IACS)	伸长率 (%)	软化后伸长率 (%)	拉断力 (kN)	软化后拉断力 (kN)	扭转圈数
CTHA120 无氧铜杆连续挤压拉制法	102.2	7.78	11.4	47.42	44.90	7.25
CTHA120 连铸无氧铜杆—轧制—拉制法	96.6～98.3	4.4	—	45.56	40.08	5
TB/T 2821—1997	≥96.5	≥2.8	—	≥42.35	≥38.12	≥5

3）增加了一个连续挤压的工序，制造成本会有所上升。此外，对连续挤压铜或铜合金无论在理论上和实践上都有值得进一步深入研讨的价值，更有待于在线路上的实际运行中接受考验和积累中国自己的经验。

（2）当今世界上导电用铜和铜合金杆及其制品，从杆坯而言共有两种，一种为无氧铜杆，由连铸法生产；另一种为低氧韧铜杆，由连铸连轧法生产。两者无论在技术上或应用上都可以说是旗鼓相当，谁也代替不了谁，所以关于“无氧铜杆制造的接触导线不能在电气化铁路上应用”的观点是错误的。今后制造接触导线的三种方法，即连铸连轧低氧韧铜杆—拉制法、无氧铜杆—轧制—拉制法和无氧铜杆连续挤压—轧制—拉制法，可能是并存的，具有公平竞争的势态，要看导线的性能价格比。前两种方法在国内外事实上也是并存的。

目前接触导线的价格，国内价比国外进口价便宜得多，而且国内制造的接触导线，其质量至少与国外相当，因此国内产品应有强劲的竞争力。

（3）在接触导线的生产过程中，实施在线连续擦伤，对

提高产品质量有现实的意义，应切实研究解决技术和应用问题。

无论用什么方法制造接触导线，除外在缺陷外，都少不了存在内在缺陷，如气孔、夹杂、“冷夹”、“深层复边”等，这是更难防备和检查的。既然都不可完全避免，但也应尽可能加以控制，使之符合内在质量检测的标准要求；另外，在生产过程中实现连续涡流探伤，甚至再加其他探伤方法的联合探伤是很有实际意义的，应与无损探伤研发单位合作，研究开发适用于接触导线型材探伤的方法、仪器和标样制作，并使之实用化。

（4）关于接触导线表面的“小波浪”问题。据生产实践证明，杆坯组织的粗细与“小波浪”无直接的关系，上列三种制造接触线的方法都是如此。关键是要防止从拉线机到成品线上收线盘时的振（抖）动，只要对此控制并增加适当措施，“小波浪”都是可以符合规定要求的。

据江铜集团铜材公司和江西理工大学报道，已研制成功铜铝复合接触导线，并在江西铜业集团、江西鹰潭旺龙铜业公司、西南铝业有限公司等企业进行产业化开发。铜铝复合接触导线由银铜和铝线复合而成，主要用于磁悬浮铁路机车供电。在国内首次提出了铜铝接触导线的产品标准，属接触导线家族中的新成员。

铜镁合金绞线是在电气化铁路上与接触导线配套使用的产品，用于电气化铁路接触网的承力索和吊弦。由于铜镁合金线的强度高，能使接触网轻型化，还改善接触网的弹性，以满足高速电气化铁路运行的要求。江阴市电工合金厂生产的铜镁合金绞线的主要技术指标如表 3.2-46 所示。

表 3.2-46　　铜镁合金绞线主要技术指标

项目 \ 产品规格		THJR—10mm²	THJR—16mm²	THJ—35mm²	THJ—50mm²	THJ—70mm²	THJ—95mm²	THJ—120mm²	THJ—150mm²
绞线结构（单线根数/单线直径）		7×7/0.50	7×7/0.65	7/2.50	7/3.00	19/2.10	19/2.50	19/2.80	37/2.25
单线抗拉强度（绞前/绞后）（MPa）		620/589		618/589					
绞线拉断力（kN）		5.67	9.58	20.17	58.58	38.64	54.75	67.57	86.37
直流电阻（Ω/km）20℃		2.953	1.747	0.819	0.369	0.43	0.303	0.242	0.193
载流量（A）	最高温度 95℃	85	120	150	185	230	280	354	400
	最高温度 150℃	115	160	200	250	315	380	470	545
振动		≥2×10^6							
疲劳		≥5×10^5							
材质		镁含量 0.45%～0.50%							

注 1. 振动试验条件：试样长 6m，经受振幅 35mm，频率 2～4Hz，张力：16mm²-1.5kN，35mm²-3.5kN，50mm²-10kN，70mm² 和 95mm²-15kN，120mm² 和 150mm²-20kN。

2. 疲劳试验条件：试样长 6m，经受张力为 30%规定张力，频率 1～3Hz，正弦波，疲劳试验达 5×10^5 后，拉断力值大于或等于 90%绞线拉断力规定值。

7.3　铜导体在电机、变压器、开关上的应用

铜导体在电机、变压器、开关及供配电设备安装上的应用，它主要的产品和用途为：扁线、中小型母线和铜排、空心导线，用于电机电器的绕组线圈、高低压开关及供配电设备安装；梯形铜排，用于制造直流电机、励磁电机等的换向器；异形铜排，用于制造高低压开关的触头；换位导线，主要用于制造大型油浸式电力变压器、牵引变压器和电抗器绕组等。无锡环宇电磁线有限公司已具有换位能力达 5～63 根，换位导线最大尺寸 100mm（最大高度）、25mm（最大宽度）；换位节距 8b～20b；一次绕包绝缘 24 层，年产量达 60 万 m 以上的换位导线生产线。江阴市电工合金有限公司生产的无氧铜母线（WTMR、WTMY）、高硬度银铜梯排（采用半连铸下引法制坯—梯形热轧—梯形冷轧—组合模拉制工艺）和异形铜排（采用挤压—拉制成形工艺），可达下列主要技术指标：

无氧铜母线——力学性能：伸长率≥40%（软母线），抗拉强度≥206N/mm²（硬母线）；电阻率：≤0.017 10 Ω·mm²/m（≥100.8% IACS）（软母线）和≤0.017 60 Ω·mm²/m（≥98% IACS）（硬母线）。

高硬度银铜梯排——表面硬度：常温下，HB 97～105，加热 300℃保温 1h，冷却至室温时硬度不低于常温下硬度的 2%；电导率：≥97% IACS；含银量：(0.16%～0.25%)银。

异形铜排——含铜量：≥99.9%；表面硬度：HB 80～90；形状：“T”形、“U”形和“M”形三类。

湖南特种电磁线厂采用上引法连铸扁坯—冷轧—拉制法工艺生产的中、小型无氧铜母(扁)线为电机绕组线配套。上引法铸坯尺寸有圆形 20mm，矩形 12×40、12×50、12×60 等数种，坯料与冷轧、拉制成品尺寸举例如表 3.2-47 所示。

表 3.2-47　　中、小型无氧铜母（扁）线举例

拉制（mm）		冷轧（mm）	坯料（mm）
成品	过程		
2.24×16	2.70×16.4	3.4×17.0	φ20.0
⋮	⋮	⋮	
2.80×25	3.50×25.6	4.4×26.2	
2.80×30	3.50×30.6	4.4×31.2	12×40
3.55×21.2	4.30×21.7	5.4×22.3	φ20.0
⋮	⋮	⋮	
3.55×25	4.30×25.6	5.5×26.2	
3.55×30	4.35×30.6	5.5×31.2	12×40
3.55×40	4.40×40.6	5.6×41.2	
4.00×20	4.80×20.6	6.0×21.2	φ20.0
⋮	⋮	⋮	
4.00×25.0	4.90×25.6	6.2×28.0	
4.00×28.0	5.0×28.5	6.3×29.1	12×40
⋮	⋮	⋮	
40.0×40.0	5.0×40.5	6.3×41.2	
4.00×45.0	5.0×45.5	6.4×46.2	12×50
4.00×50.0	5.0×50.5	6.4×51.2	

续表

拉制（mm）		冷轧（mm）	坯料（mm）
成 品	过 程		
4.00×56.0	5.0×56.5	6.4×57.2	12×60
4.00×60.0	5.0×60.5	6.4×61.2	
4.25×30.0	5.2×30.6	6.5×31.5	12×40
⋮	⋮	⋮	
4.50×31.5	5.2×32.0	6.5×32.2	
4.50×45.0	5.5×45.6	7.0×46.3	12×50
4.50×50.0	5.6×50.6	7.0×51.4	
5.0×20.0	6.0×20.6	7.5×21.4	φ20.0
5.00×30.0	6.1×30.6	7.5×31.4	12×40
5.00×40.0	6.2×40.6	7.9×41.4	
5.00×50.0	6.3×50.6	8.0×51.4	12×50
5.00×60.0	6.3×60.6	8.1×61.4	12×60
5.50×22.0	6.7×22.6	8.4×23.4	φ20.0
5.50×30.0	6.7×30.6	8.4×31.4	12×40
5.50×40.0	6.8×40.5	8.4×41.2	
5.50×50.0	6.8×50.5	8.4×51.2	12×50
6.00×20.0	7.2×20.6	9.0×21.4	φ20.0
6.00×25.0	7.2×25.6	9.0×26.4	
6.00×26.0	7.2×28.6	9.0×29.4	12×40
⋮	⋮	⋮	
6.0×40	7.4×40.8	9.0×41.5	
6.0×50	7.4×50.7	9.0×51.5	12×50
6.0×60	7.4×60.7	9.2×61.5	12×60
6.3×17	7.5×17.7	9.2×18.5	φ20.0
⋮	⋮	⋮	
6.3×25	7.5×25.7	9.2×26.6	
6.3×26.5	7.5×27.2	9.2×28.0	12×40
6.3×35.5	7.6×36.4	9.4×37.5	

续表

拉制（mm）		冷轧（mm）	坯料（mm）
成 品	过 程		
6.3×40	7.6×41.0	9.4×42.0	12×50
6.3×45	7.6×46.0	9.5×47.0	
6.3×50	7.6×51.0	9.5×52.0	12×60
7.1×18	8.4×19.0	10.0×20.0	φ20.0
7.1×22.4	8.4×23.4	10.0×24.5	
7.1×28	8.4×29.0	10.0×30.0	12×40
7.1×31.5	8.5×32.2	10.5×33.5	
7.1×40	8.5×40.8	10.5×42.0	12×50
7.1×50	8.5×50.8	10.5×52.0	12×60
7.5×14.5	8.9×15.2	10.8×16.0	φ20.0
7.5×21.5	8.9×22.2	10.8×23.0	
7.5×30.0	9.0×30.8	10.8×31.5	12×40

作绕组线圈用的铜电磁线往往需要软态的铜扁线和母线。采用“康仿”（Conform）连续挤压技术制造，其优点在于：用无氧或低氧铜杆可直接挤到制品的尺寸，从而成本低；制品不需退火，节能显著；变换制品规格仅需1只模具，快速方便，特别适于小批量、多品种生产；制品长度大，连续生产，生产效率高。英国BWE公司创新采用“感应加热器”挤压铜型材，由于在较高温度下的快速预热使得启动非常简单，挤出轮和工具上的压力也相对较低。除了提高效率和延长工具使用寿命外，系统能在较高温度下支持模具，扩大产品系列规格和复杂性。第一台用“感应器加热”的“Conform 350i”机组为变压器和电机生产矩形铜带和各种铜型材；“Conform 550i”机组用于生产规格较大的铜扁线和母线。图3.2-61示出了国产铜扁线连续挤压生产线的示意图。

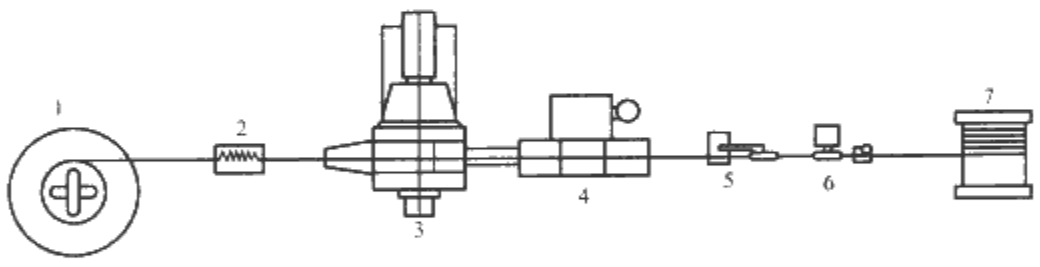


图3.2-61 铜扁线连续挤压生产线示意图

1 铜杆放出；2—矫直；3 连续挤压机；4—防氧化和冷却系统；5—摆臂；6—计米、涂油；7—收线机

8 铜和铜合金的专用试验方法

国际标准化组织ISO/TC26制定的铜及铜合金专用试验方法国际标准有：硝酸亚汞试验、氢脆试验、氧化膜粘附性试验、平均晶粒度的测定和螺旋伸长试验。

8.1 硝酸亚汞试验

由于多数铜合金对应力破裂都有不同程度的敏感性，特别是黄铜和锡青铜挤制与拉制产品。因此，各国都很重视铜加工产品在出厂前消除内应力。许多国家制定的检验内应力的标准有硝酸亚汞试验法和氨熏法。早在1978年，ISO/TC26就制定了用硝酸亚汞来检验铜合金中的残余应力的试验方法，即ISO 196—1978《加工铜和铜合金—残余应力测定—硝酸亚汞试验》，对关于应力的术语、试样制备、操作程序作了具体规定。

（1）定义。应力腐蚀破裂是指在腐蚀和残余应力或腐蚀和施加应力联合作用下的破裂而造成金属材料自发的损坏。

残余应力是指由于塑性变形而残留于物体中的应力。

施加应力是指由于外加负荷而产生的并存在于物体中的应力。

（2）试液。规定的试液为每升溶液中含10g硝酸亚汞及10mL硝酸的水溶液。溶液制备步骤为：溶解11.4g硝酸亚汞二水合物（$HgNO_3 \cdot 2H_2O$）或10.7g硝酸亚汞一水合物（$HgNO_3 \cdot H_2O$）于大约40mL蒸馏水中，用10mL硝酸（ρ_{20}为1.40～1.42g/mL）酸化，待晶体完全溶解后，用蒸馏水将溶液稀释至1000mL。硝酸亚汞晶体有剧毒，操作时必须小心。如加热制备硝酸亚汞溶液，应注意防止硝酸的损失。

（3）试样。对于直径等于和小于75mm的加工产品，试样的长度至少为150mm；对直径大于75mm的产品，试样长度须经协商确定。

（4）试验步骤。先将试样除油，然后完全浸入硫酸水溶液（体积15%）中，或浸入含有60份（体积）蒸馏水和40份（体积）浓硝酸混合液中，时间不超过30s，以除去全部

含碳物质和氧化膜。从酸浸液中取出试样后，立即用自来水冲洗。然后将试样沥干，再完全浸入试液中。试样每平方厘米的暴露表面至少用 1.5mL 试液。

30min 后，从试液中取出试样，在自来水中冲洗，再擦去表面的剩余汞。除在产品标准中另有规定外，应立即检查试样。产品标准可能允许检查前有一时间间隔。这个时间间隔随被试验合金的不同而不同。当对试验表面的裂纹有怀疑时，可在电炉或烘炉中加热试样，使其表面的汞挥发（必须谨慎），再用适当的放大设备放大 10～18 倍检查试样表面的裂纹。

汞对健康有明显的危害。因此，建议使用能检验和除去在挥发时产生的汞蒸气的设备。操作时应戴橡皮手套。

（5）试验结果。试验后，试样表面情况的判定要求由有关的产品标准规定。

8.2 氢脆试验

氢脆试验是适于检验高电导率脱氧铜和无氧铜中含氧情况的定性方法。ISO 2626—1973《铜—氢脆试验》对进行该试验的各种条件进行了具体规定。

（1）原理。将制备的试样在含氢的气氛中加热。如果金属中有氧存在，则会发生反应，使金属发脆。冷却试样不要与空气接触。然后按 ISO 7438《金属材料弯曲试验》［见 8.2（4）1）或 ISO 7801《金属线材反复试验方法》（见 8.2（5）］的规定进行闭合弯曲或反复弯曲，或通过金相检验来测定材料的氢脆性。

（2）试样。进行弯曲《或反复弯曲》试验的试样应有合适的长度。试样应为材料的整个横截面，或具有不大于 12mm（0.5in）的厚度或直径［反复弯曲试样的厚度或直径不大于 2.5mm（或 0.1in）］。试样的棱边均应打圆并磨光。不包含整个横截面的试样应含有该材料原始表面的某一部分。

金相检验用的试样应有合适的尺寸，至少应包含材料的一个外表面。

（3）试验步骤与检验。首先对试样进行氢处理，即将试样置于不少于 10%氢气气氛的炉中在 825～875℃的温度下加热 30min，然后在炉内气氛中冷却或淬入水中冷却。氢处理后，根据要求，对试样进行闭合弯曲或反复弯曲或金相检验。

闭合弯曲检验在室温下进行。检验示意图如图 3.2-62 所示。检验过程是对试样 AB 在垂直于试样长度的方向上施加均匀的压力，直至 A 端达到 C 的位置。材料的原始表面应在弯曲试样的外侧。

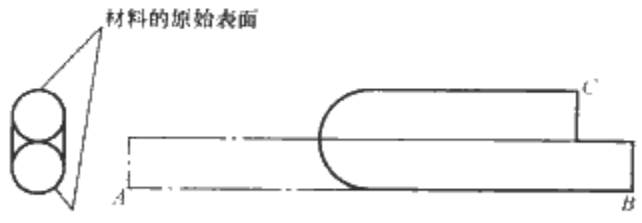


图 3.2-62 闭合弯曲示意图

闭合弯曲通常分两步进行。首先将试样弯成 V 形。然后将 V 形试样的两端用均匀的压力压至两端接触。弯曲后用肉眼检查试样的受力表面是否出现裂纹。

反复弯曲检验按 ISO 7801 的规定进行。将试样反复弯曲 10 次，使材料的原始表面承受最大的压力。弯曲后用肉眼检查试样的受力表面，看是否出现裂纹。

进行金相检验时，截取试样要使试样外表面与截面成 90°，将磨片抛光，需要时可进行腐蚀，然后在显微镜下放大 200 倍进行检查，观察由于氢脆而产生的晶粒间界裂纹。

（4）金属材料弯曲试验方法（ISO 7438）简介。弯曲试验是检验金属承受规定弯曲程度时的塑性变形能力，并显示其缺陷的一种工艺性能试验。ISO7438—1985《金属材料弯曲试验》规定了检验这种工艺性能的试验方法。该试验方法所适用的金属材料应在有关的产品标准中作出规定。该试验方法不适用于某些材料和（或）产品，例如整截面管或焊接接头。对这些产品或材料的试验另有标准。

1）原理。弯曲试验是使圆形、方形、矩形或正多边形截面的试样弯曲，产生塑性变形，并在不改变加荷方向的情况下直到使试样达到所规定的弯曲角。

试样左右两部分的轴线保持在垂直于弯曲轴的平面内。弯曲 180°时，左右两部分的表面根据材料标准的要求可以互相接触或留有一定的距离并互相平行，用塞人物来控制这一距离。

2）符号及意义。弯曲试验所使用的符号及意义见表 3.2-48、图 3.2-63 和图 3.2-64，弯曲 180°时的示意图见图 3.2-65。

表 3.2-48 符号及意义

符 号	意 义	单 位
a	试样厚度或直径（或正多边形内切圆直径）	mm
b	试样宽度	mm
L	试样长度	mm
l	支座间距离	mm
D	芯轴直径	mm
α	弯曲角	(°)
r	弯曲后试样弯曲部分的内侧半径	mm

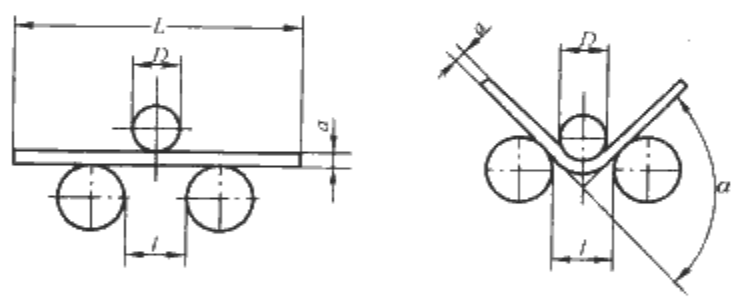


图 3.2-63 两个支座的弯曲试验示意图

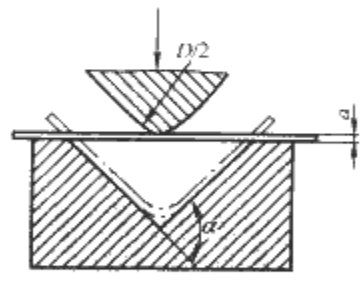


图 3.2-64 V 形弯曲试验示意图

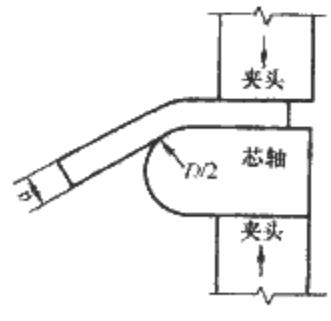


图 3.2-65 弯曲 180°时示意图

3）试验设备。弯曲试验应在具有下述装置的试验机或压力机上进行。

a. 弯曲装置具有两个支座和一个芯轴（见图 3.2-63）。

支座的长度和芯轴的宽度应大于试样的宽度或直径。芯轴的直径按材料标准的规定确定。试样的支座和芯轴应有足够的硬度。除另有规定外，支座之间的距离 l 应为

$$l=(D+3a)\pm a/2$$

在弯曲试验过程中，l 不应改变。

b. 弯曲装置具有一个V形支座和一个芯轴（见图3.2-64）。V形支座两斜面的夹角应为 $180°-\alpha$。该角在相应的标准中予以规定。V形支座边缘的圆角半径应为试样厚度的1～10倍，支座应有足够的硬度。

c. 弯曲装置具有一套夹紧装置（见图3.2-65）。夹紧装置由夹头和具有足够硬度的芯轴组成，可以装一操纵杆用以向试样施力。

4）试样。试验应使用圆形、方形、矩形或正多边形横截面的试样。取样过程中受到剪切、火焰切割或类似的操作影响的材料部分均应去除。但试验时，只要结果令人满意，受上述影响的部分也可允许存在。

矩形试样的边部应倒圆，圆弧半径不超过试样厚度的1/10。圆角处不应有横向毛刺、刮伤或刻印形成，以免影响试验结果。但只要试验结果令人满意，也可不倒圆边部。

除在相关的标准中另有规定外，试样宽度应符合下述要求：

a. 如产品宽度不大于20mm，试样宽度取产品的宽度。

b. 当产品宽度大于20mm时，对产品厚度小于3mm者，试样宽度取（20±5）mm，对产品厚度等于或大于3mm者，试样宽度取20～50mm。

取自板、带、型材的试样，其厚度应等于被检验产品的厚度。如果产品的厚度大于25mm，可机加工试样的一个表面使其厚度减小，但应不小于25mm。弯曲时，试样未机加工的一侧应为试样承受拉伸应力的表面。

圆形或正多边形截面试样，如直径或内切圆直径不大于30mm，应具有与产品相同的横截面；如直径或内切圆直径大于30mm而不超过50mm，可使其减小到不小于25mm；如试样直径或内切圆直径大于50mm，则应将其减小到不小于25mm，见图3.2-66。试验时未机加工的一侧应为试样承受拉伸应力的表面。

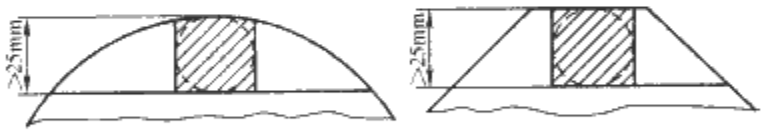


图3.2-66 试样直径从大于50mm减至不小于25mm

试样长度取决于试样厚度和所使用的试验设备。

5）试验程序。通常试验在环境温度10～35℃进行。在控制条件下进行的试验，温度应为（23±5）℃。

弯曲试验应使用下述方法之一（在相关的标准中规定）：

a. 在力的作用下按给定条件达到规定的弯曲角，见图3.2-63、图3.2-64和图3.2-65。弯曲应在支座之间的中点处进行，力的增加要均匀连续且缓慢，以保证良好的塑性变形状态。如果这些方式不能直接达到规定的弯曲角，可向试样两端直接加压来完成弯曲操作，见图3.2-67。

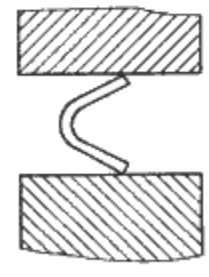


图3.2-67 在试样两端加压

b. 在力的作用下，试样左右两侧相互平行并保持规定的距离。为此，选按Ⅰ的方式弯曲试样，然后放置在两平行压板之间，见图3.2-68，逐渐加压至两侧相互平行。在这一步操作时可放置也可不放置塞入物。如需用塞入物时，其厚度应在有关标准中规定。此外，也可在芯轴上进行弯曲，详见本节（4）3）c.的内容。

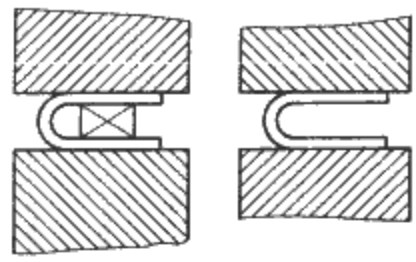


图3.2-68 两侧面平行弯曲

c. 试样左右两部分在力的作用下弯曲到直接接触，见图3.2-69。

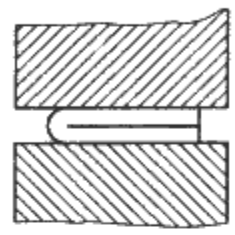


图3.2-69 两侧面接触弯曲

6）结果说明。弯曲试验的说明按材料标准的要求进行。如材料标准中未规定，在不放大的情况下无肉眼可见的裂缝则表明试样通过弯曲试验。材料标准中规定的弯曲角总是作为最小值考虑的，如规定了弯曲内侧半径，则为最大弯曲角。

7）试验报告。试验报告应包括下述内容：该国际标准编号；试样标记（标准种类、浇注号、试样轴线与产品的关系等）；试样的形状和尺寸；试验方法；试验结果。

（5）金属线材反复弯曲试验方法（ISO 7801）简介。反复弯曲试验用以检验线材耐反复弯曲的工艺性能。ISO 7801—1984《线材反复弯曲试验方法》规定了直径或厚度为0.3～10mm金属线的反复弯曲试验方法。该国际标准适用的直径或厚度范围，在相应的产品标准中作具体规定。20世纪70年代由国际标准化组织ISO/TC17制定的ISO 144—1973《钢丝的反复弯曲试验》和ISO/TC26制定的ISO 2625—1973《铜及铜合金线材的反复弯曲试验》均已撤销，而被ISO 7801—1984取代。

1）原理。将一试样的一端固定，使试样绕某一规定的弯曲圆弧半径按相反的方向反复弯曲90°。

2）符号及意义。线材反复弯曲试验所使用的符号及意

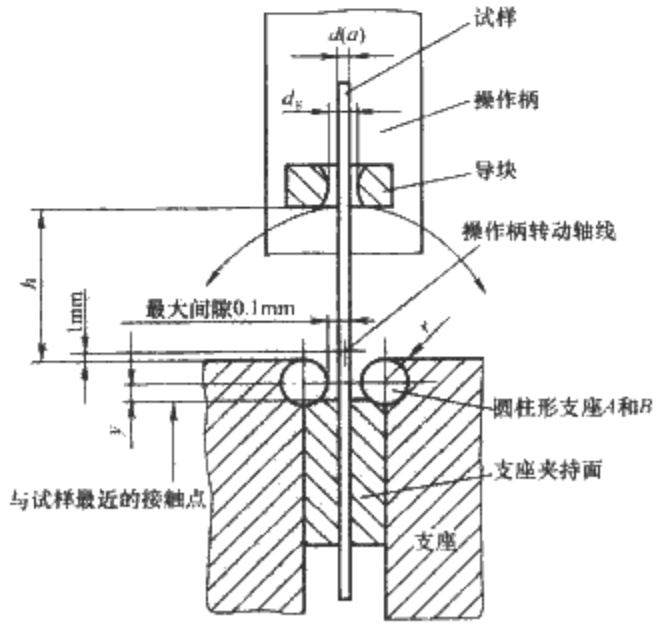


图3.2-70 反复弯曲试验机示意图

义见表 3.2-49 和图 3.2-70。

3）试验设备。试验机应符合图 3.2-70 所示的结构、主要尺寸应符合表 3.2-50 的要求。

表 3.2-49 符号及意义 mm

符 号	意 义
d	圆线直径
a	两支座夹持面间能夹持的非圆形线的最小厚度
r	圆柱形支座的半径
h	圆柱形支座顶部切面至导块底面之距离
d_g	导块孔直径
y	两圆柱形支座轴线确定的平面至与试样最近的接触点的距离
N_b	反复弯曲次数

表 3.2-50 试验机主要尺寸 mm

线材名义直径或厚度 d（a）	圆柱形支座半径 r	距离 h	导块孔直径①d_g
$0.3 \leqslant d(a) \leqslant 0.5$	1.25±0.05	15	2.0
$0.5 < d(a) \leqslant 0.7$	1.75±0.05	15	2.0
$0.7 < d(a) \leqslant 1.0$	2.5±0.1	15	2.0
$1.0 < d(a) \leqslant 1.5$	3.75±0.1	20	2.0
$1.5 < d(a) \leqslant 2.0$	5±0.1	20	2.0 和 2.5
$2.0 < d(a) \leqslant 3.0$	7.5±0.1	25	2.5 和 3.5
$3.0 < d(a) \leqslant 4.0$	10±0.1	35	3.5 和 4.5
$4.0 < d(a) \leqslant 6.0$	15±0.1	50	4.5 和 7.0
$6.0 < d(a) \leqslant 8.0$	20±0.1	75	7.0 和 9.0
$8.0 < d(a) \leqslant 10.0$	25±0.1	100	9.0 和 11.0

①应选择合适的导块孔直径以保证线材能自由活动。

a. 圆柱形支座和夹持面。圆柱形支座和夹持面应有足够的硬度（具有刚性并耐磨）。圆柱形支座半径 r 不应超出表 3.2-50 的允许偏差。两圆柱形支座的轴线应垂直于弯曲平面，并在同一平面内，不平行度不应超过 0.1mm。夹持面应比圆柱形支座面稍为突出，试样与每个圆柱形支座之间的间隙不超过 0.1mm。夹持面顶边应低于圆柱形支座圆弧中心两者相距 y。当圆柱形支座半径 $r \leqslant 2.5$mm 时，$y=1.5$mm，当 $r>2.5$mm 时，$y=3$mm。

b. 操作柄和导块。操作柄转动轴线至圆柱形支座顶部的距离，对所有尺寸的支座均为 1.0mm。导块孔的每端应较宽松，孔径应符合表 3.2-50 的规定。

4）试样。用作试样的一段线材应是直的，但在试验弯曲的平面内允许呈现轻微的弯曲。如必须矫直时，应用手工矫直。如需垂直时，应在木质、塑料或铜的平面上，使用与平面相同材料的小锤矫直。在矫直过程中，线材表面不得受损伤，试样不应被扭拧。带有局部锐弯的线材不得矫直。

5）试验程序。通常试验在环境温度为 10～35℃下进行。在控制条件下完成的试验，温度应为 23℃±5℃。支座半径 r、距离 h 和导块孔直径 d_g 应按表 3.2-50 根据线材直径选定。

使操作柄与水平面垂直，试样通过导块的孔插入，如图 3.2-70 所示。使试样的下端固定在夹头之间，并与圆柱形支座的轴线垂直，在夹持非圆形试样时，应使试样较大尺寸平行（或大致平行）于夹持面，如图 3.2-71 所示。

交替沿相反的方向使试样弯曲 90°。一次弯曲包括使试样弯曲成 90°后再回到原来的位置，随后的弯曲在相反的方向进行，如图 3.2-72 所示。连续进行弯曲不要中断试验。

以均匀的速率进行弯曲，不应有冲击，每秒钟不超过一

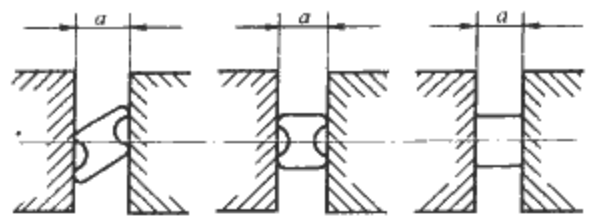


图 3.2-71 非圆形试样的夹持

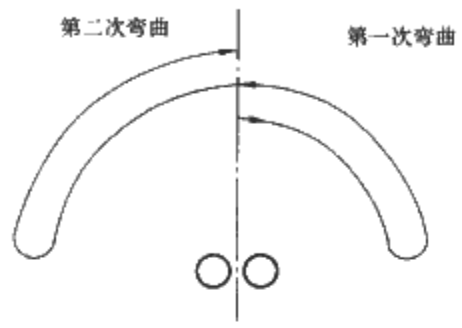


图 3.2-72 反复弯曲示意图

次弯曲。必要时，可降低弯曲速率，以保证弯曲所产生的热量不影响试验结果。在试验过程中为了保证试样与圆柱形支座之间的连续接触，可实行某种强制措施，如施加不大于线材名义抗拉强度值 2%的拉应力。但当相应标准中另有规定时除外。

连续进行试验直到完成相应标准中所规定的弯曲次数，或对试样不使用放大器可观察到开裂时为止。如在相应的标准中有规定，也可继续进行试验直到试样完全断裂。出现裂缝或断裂的那一次弯曲不应计入弯曲次数 N_b 中。

6）试验报告。试验报告应包括下述内容：该国际标准编号；试样鉴别（如材料种类、浇注号等）；试样的名义直径 d 或最小厚度 a；制备试样的有关情况（如矫直）；试验条件（如圆柱形支座的半径 r，弯曲时施加的拉应力）；结束试验的判断依据；试验结果。

8.3 氧化膜黏附性试验

氧化膜黏附性试验用于检验高导电无氧铜产品，以评定用于电子器件、玻璃与金属封接以及其他依靠形成氧化铜黏附膜等用途的无氧铜的适用性。ISO 4746—1977《无氧铜氧化膜黏附性试验》规定了高导电无氧铜的氧化膜黏附性试验方法。

（1）原理。将试样在空气中加热，随后在水中快速冷却，观察冷却后试样上氧化膜的消失或起皮情况。

（2）试样及制备。试验用的试样为直径 1～2mm 的线材，或为最大横截面 2mm×12mm 的扁条。如果氧化膜黏附性程度令人满意的话，也可以采用较大的加工试样或铸造试样进行试验。

制备试样时，应完全清除表面氧化物。表面质量应均一，不应存在夹杂，特别是氧化亚铜。试样表面应类似于用 400 号碳化硅湿磨过的表面。在试验前，应将试样去油，浸在 10%（V/V）硫酸中清洗，以获得光亮洁净的表面，然后在自来水中清洗，再在蒸馏水中洗净，在酒精或丙酮中洗净后烘干。在清洗和随后的加热时间不要用手接触试样。

（3）操作步骤。进行试验时，将试样在空气中于 850～875℃加热 30min，然后立即将试样浸入冷水中。

（4）试验结果。用肉眼检查试验过的试样。试样表面的黑色氧化膜不应出现实质性的破损，并且牢固地黏附在铜上。试样边部黏附性稍差，可忽略不计。试样上不应有起皮或氧化膜损坏，颜色应均匀。

8.4　平均晶粒度测定

ISO/TC26 制定的平均晶粒度测定标准 ISO 2624 适用于主要由单一相组成的铜及铜合金材料，规定了 3 种测定平均晶粒度的方法，即对比法、交线法［海恩（Heyn）法］和平面测量法［杰弗里斯（Jeffries）法］。

（1）原理。对比法是把试样与标准图片进行对比，这对于大多数工业应用而言是最方便的，而且有足够的准确度。交线法是通过直线切割晶粒，计算每个晶粒平均所占直线的长度，作为平均晶粒度。平面测量法是通过一给定面积，由单位面积占有的晶粒数推算出平均晶粒度。

交线法和平面测量法有较高的精确度。在有争议的情况下，究竟采用哪种晶粒度测定方法，应由有关方面协商确定。对于非等轴晶结构材料，建议采用交线法。

（2）试样及制备。晶粒度测定应在每个试样磨片上不少于 3 个有代表性的视场中进行。对已知为等轴晶结构的材料，只需在试样上取 1 个有代表性的磨片；对于非等轴晶或未知其晶粒结构者，则应在试样上取 3 个互相垂直的磨片。

制备试样，为显示晶界采用衬度腐蚀，以便与标准图进行对比。

（3）符号及意义。测定晶粒度所使用的符号及含义如下：

f——用平面测量法测定每平方毫米中晶粒数所用的杰弗里斯因子；

m——每平方毫米的晶粒数；

d——平均晶粒“直径”，mm；

l——交线平均长度；

M——放大倍数。

（4）测定过程。用对比法测定晶粒度时，把试样有代表性视场的显微照相的投影图像与标准晶粒度金相照片直接对比，或与适当的复制品直接对比。如没有投影显微镜，可以采用台式显微镜。为便于进行对比，可做一些机械装置，使之能把标准晶粒度的金相照片依次移到投影图像旁边。

用交线法测定晶粒度时，要在投影显微镜的玻璃屏上，在带分度镜的台式显微镜的图像上，在有代表性视场的显微照相上，或在试样本身上，计数被一条或几条直线所交截的晶粒数。通常每条直线至少要交截 10 个晶粒，所有直线所交截的晶粒数不应少于 50 个。仲裁检验时，全部直线交截的晶粒数不应少于 200 个。被直线端部触及的晶粒计半个晶粒。磨片表面上的直线长度或几条直线的长度(mm)除以所交截的晶粒数，就获得平均交线长度 l。实际上可以认为平均交线长度 l 等于平均晶粒直径(为了获得与平面测量法或对比测定法的晶粒“直径”相一致，交线长度应乘以因数 1.13)。

对于非等轴晶结构，应在试样的 3 个互相垂直的方向所取的磨片上进行纵向和横向的测定。平均晶粒“直径”的计算方法同上。

用平面测量法测平均晶粒度时，将已知面积（为简化计算，一般采用 5000mm^2）的圆形或矩形反映在显微照片上或反映在投影显微镜的玻璃屏上。然后选择放大倍数。通常在要计数的视场中至少要有 50 个晶粒，对于仲裁至少要有 200 个晶粒。当图像聚焦好时，计算在这个面积内的晶粒数。完整地包含在已知面积内的晶粒数加上被该面积周缘切割的晶粒数的一半即作为在所取放大倍数下该面积内的等效整晶粒数。如果将等效整晶粒数乘以杰弗里斯因子 f，其乘积就是每平方毫米的晶粒数 m。表 3.2-51 是放大倍数与因子 f 的对应关系。每个视场中的平均晶粒“直径”可由公式 $d=1/\sqrt{m}$ 计算获得。

表 3.2-51　　对 5000mm^2 面积的杰弗里斯因子

所采用的放大倍数 M	得到每平方毫米晶粒数的杰弗里斯因子 f
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75①	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

① 当视场直径为 75mm，所采用的面积为 5625mm^2（圆的直径为 84.5mm）时，杰弗里斯因子 f 将为整数 1。

（5）试验报告。用对比法时，对每个视场测得的晶粒度，应按最邻近的标准晶粒度图片的晶粒度报出（见图 3.2-73）。在需要单一数字的情况下，可报出这些结果的中值。

标准晶粒度图片是在放大倍数为 75 倍的情况下制备的，一般对铜及铜合金是适用的。如果要使用其他放大倍数，可从表 3.2-52 中查出相应的晶粒度。该表中的数值已修约为商业上应用要求的近似值。

从表 3.2-52 可获得不同放大倍数下晶粒度的比较数值。例如，和标准图片 75 倍晶粒度 0.050mm 相比较，250 倍晶粒度应为 0.015mm（25 倍时的 0.150mm 除以 10）。通常计算时，可按标准图算出某一视场的晶粒度。

用交线法或平面测量法时，对等轴晶材料，要报告已测定的 3 个或更多有代表性视场中的每一个结果。当要求单一数值时，则报告这些结果的中值。对非等轴晶材料，用交线法时，应报告 3 个方向上的每一个结果，或者取单独的视场，或者取每一方向相应的中值。

对于混合晶粒，例如在热加工金属中就存在这种情况，这时用对比法或报出两种晶粒度各自的面积百分数，或报出晶粒度的两个范围。

表 3.2-52　　在不同放大倍数下观测时实际晶粒度与标准级别图（75 倍）的对应关系

放大倍数	成像和标准图相比较时的晶粒度（mm）												
75 倍（标准）	0.010	0.015	0.020	0.025	0.035	0.045	0.050	0.060	0.070	0.090	0.120	0.150	0.200
25 倍	0.030	0.045	0.060	0.008	0.110	0.140	0.150	0.180	0.210	0.270	0.360	0.450	0.600
50 倍	0.015	0.020	0.030	0.040	0.050	0.070	0.080	0.090	0.100	0.140	0.180	0.220	0.300
100 倍	0.080	0.010	0.015	0.020	0.025	0.035	0.040	0.045	0.050	0.070	0.090	0.110	0.150
200 倍	—	0.005	0.007	0.010	0.012	0.017	0.020	0.022	0.025	0.035	0.045	0.055	0.075
500 倍	—	—	—	—	0.005	0.007	0.008	0.009	0.010	0.014	0.018	0.022	0.030

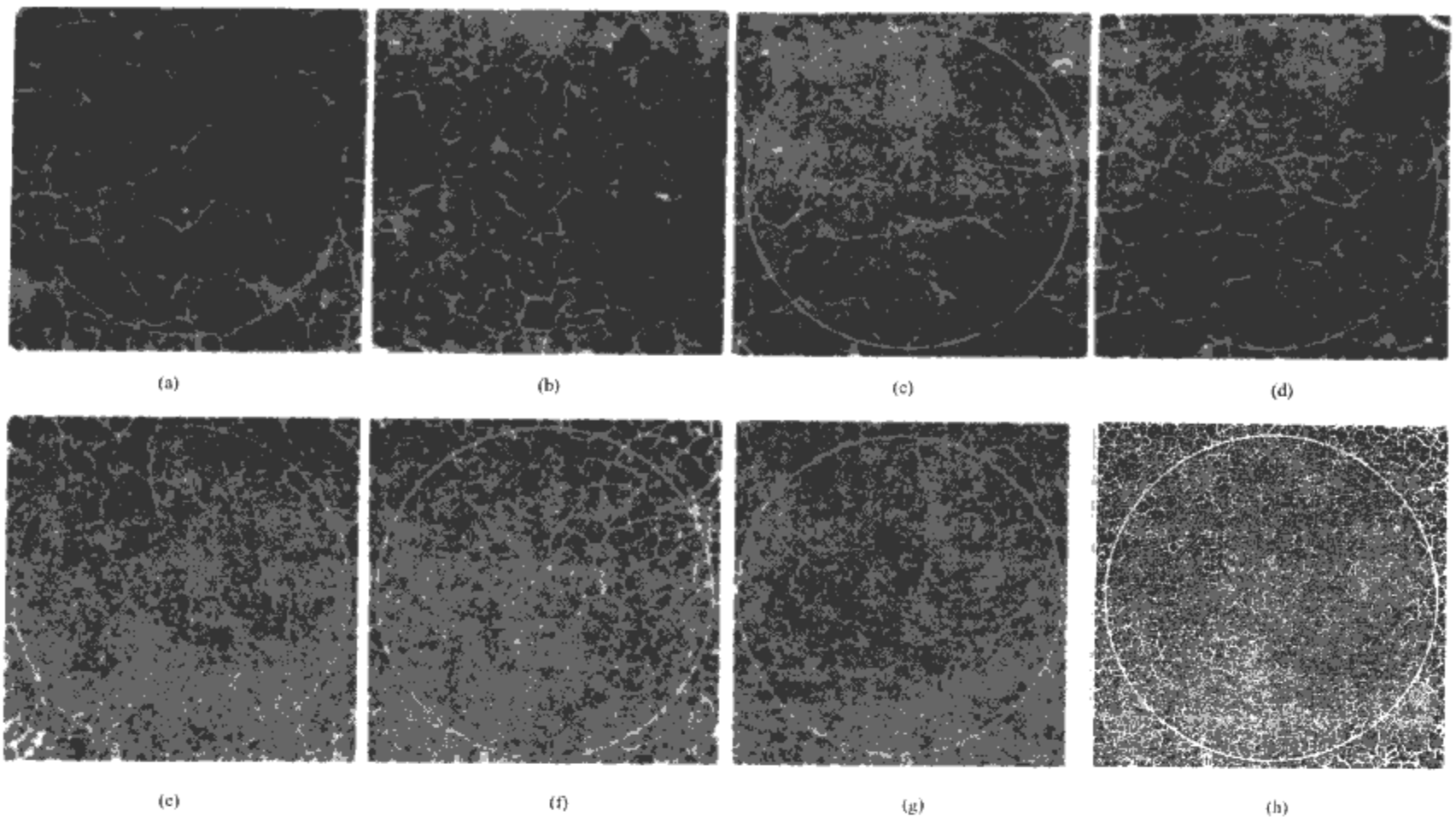


图 3.2-73 标准晶粒度图（放大 75 倍）

8.5 高电导率铜的螺旋伸长试验

国际标准化组织技术报告 TR4745 推荐的螺旋伸长试验实质上是一种测定高导电铜通过低温退火处理后软化程度的试验方法。例如要检验用于生产漆包细线的高电导率铜杆和线坯的适用性时，就可采用这种方法。该试验方法仅适用于铜线坯或线杆，而不涉及加工成商品铜线后线材的质量评价。使用退火后仍保留原先冷拉影响的铜线绕成的线圈不如退火处理后完全柔软的铜线制作的线圈那样伸长得多。

（1）原理。将在严格控制的条件下经规定的低温退火的铜线绕成螺旋形线圈，然后用规定的负荷使其伸长，去除负荷后测量线圈的长度变化。

（2）试验样品的选取。样品是直径为（6.3±0.5）mm 的线杆，其长度适于冷拉即可，应按下述方法之一制备。

1）从线锭取样品时，应在线锭中部垂直于轴向的方向切取 20mm 厚的金属片，在该金属片上按图 3.2-74 或图 3.2-75 所示的方位切 20mm×20mm 的正方形样品。

如按图 3.2-74 方位切取，在样品上切去凝固表面的富氧部分；如为垂直铸造的圆棒坯，亦用同样方法切取样品，但无需清除富氧层。

将样品轧制，锤锻或用其他合适的方法制成直径为 6.3mm 的线杆。

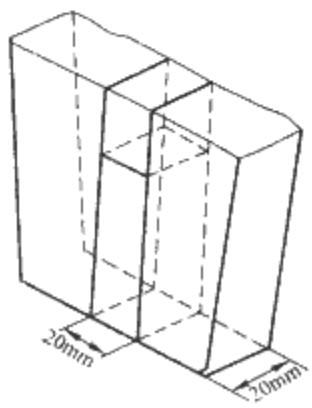


图 3.2-74 从水平铸造的线锭取的垂直样品

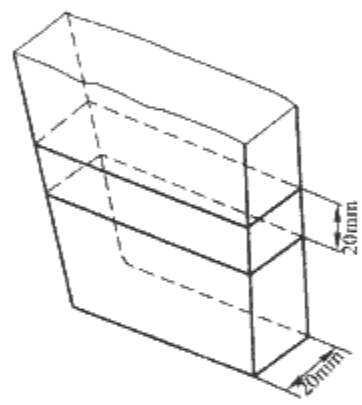


图 3.2-75 从水平铸造的线锭切取的横向样品

2）从热轧后的线杆取样品时，应从能代表整个线杆的线杆中部切取一段作为样品，其长度以适于冷拉为宜。对直径大于 6.3mm 的热轧线杆，应将所取样杆冷拉到直径为 6.3mm。

3）从连续线杆取样时，所取的长度以适于冷拉为宜。对直径大于 6.3mm 的线杆应冷拉到直径为 6.3mm。

（3）试样的制备。将按上述方法选取的试验样品置于电炉中，在常压下于 700℃±5℃保温 1h。然后迅速淬入室温的水中，或淬入 10%（V/V）稀硫酸中，再将线杆浸入硫酸中完全清洗掉氧化皮和松散的铜末。

冷拉线杆时，每一道次面积减缩率为 20%～25%。最后一道次拉伸使线杆的直径减到（2±0.01）mm。任一道次的拉伸速度不应超过 1m/s，每次拉制应为同一方向。

最后将铜线绕成一个外径为（200±10）mm 的线圈。

（4）退火处理。将线圈于（200±0.5）℃温度下退火 2h。加热设备的动作时间应以秒计，如盐浴炉、油炉或流态化床加热炉。线圈退火后淬入室温的水中，必须小心，使线圈避免受力。

（5）试验程序。从退火的线材上取长度为 1200mm 的一段，用不易擦掉的颜料或墨水在其中间部位标出两个标点。标点间距离为 1000mm。借助于芯轴上的刻槽、缺口或孔，

将线的一端固定在芯轴上。芯轴系直径为（20±0.01）mm水平安装的磨光钢轴。线的另一端悬挂重物，对线施加7N/mm²的规定应力。重物的质量按线的实测横截面积来确定，并精确至10g。缓慢地转动芯轴（约50r/min），将线绕成螺旋，并保证螺旋的圈与圈之间紧密接触。

然后测量标点之间线材所形成的螺旋的长度（约28mm），小心地将螺旋从芯轴上移下来，将其两端制成挂钩。要保证在标点之内的螺旋不变形，不受损坏。施加负荷时应尽可能是轴向的。

垂直悬挂螺旋，在下端挂上绕螺旋时所使用的重物。开始时，重物应有一平台支托，然后向下移动平台，或者向上提升螺旋的上部挂钩。移动应平稳无振动，速度不超过0.02m/s，直到重物自由地悬挂在螺旋下方。自由悬挂1min后，卸除重物，将螺旋置于桌上，使其松弛1min。最后，测量两标点之间螺旋的长度，减去原来未伸长之前螺旋的长度（28mm）。

在有疑问时，应对同一螺旋线圈进行3次试验，3次所获得结果的平均值为其螺旋伸长数值，标示为ΔL。该伸长数应修约精确至10mm。

第3章 铜合金导体

纯铜在电气工业中是最广泛应用的一种导体材料，但随着军事、航空航天、深潜、机器人、汽车、电气化铁路、轨道交通和医疗机械等工业的发展，纯铜的性能已满足不了对导体材料高性能的要求：零部件的小型化，特种电线电缆要求微细、超微细而又有高强度的性能；在高的运行温度下，既要承载高的电流，散发更多的热量，甚至又要耐磨，要求具有高的导电性；由于在高温下操作，需要改进抗应力松弛的性能；为了改善环境，满足各国政策法规、欧盟《报废电子电气设备指令》WEEE 指令和《关于在电子电气设备中禁止使用某些有害物质指令》ROHS 指令，对含有镉或铍有毒元素的铜合金导体实施代替。这些都促进了对新的铜合金导体的开发和新的制造工艺的应用。在新形势下，我国电线电缆工业为适应市场需求，建立一个完整的从铜合金导体开发、新工艺应用、导体生产、在特种电线电缆中的应用、检测到制定新的标准体系都是必要的。

作导体用的铜合金导体与 IC 引线框架和散热器叶片用铜合金的要求有类似之处，但不尽相同，其基本要求是高导电和高强度，但由于其制品——圆单线、型线和异型线、绞线和束线、编织线和金箔线，有的还要在制品上镀锡或镀银或镀镍，甚至有复合镀层——在电线电缆中的应用条件不同，所以对不同的应用，还要加某些特定的性能要求。从而铜合金导体涉及的品种（合金系）较多，从二元到四元合金系都有，而且这些导电用的铜合金一般属于高铜合金（是指在铜中加入一种或几种微量合金元素，以获得某些特定性能的合金，其铜含量一般在 96%～99.3%之间），往往不列入国家统一的合金牌号标准，从而无明确的合金成分范围以供对照，而只以公司的商标名称或系列牌号加以表示，因而在铜合金导体的应用标准中只规定铜合金导体的性能要求，而不规定铜合金材料的成分要求。

1 铜合金导体的要求、合金元素的选择和导体的加工工艺

1.1 铜合金导体的要求

根据应用的不同，对高性能铜合金导体应满足下列若干项以上的要求。

高的电导率——导体一般在硬态、软态和半软态下使用。软态的导体一般其电导率尽可能接近铜导体的水平（电导率为 100%IACS）；硬态的导体，其电导率希望在 70% IACS 以上；半软态介于两者之间。

在规定的伸长率下具有高的抗拉强度——抗拉强度和电导率两个指标，是一对矛盾，在开发的铜合金导体中，首先需要协调，以便为合金元素的选择和导体的加工打下基础。

要有好的高温耐热性和耐磨性——例如在直流电机中用的整流子梯排、电气化铁路和轨道交通用的接触导线等就有这方面的要求。

高温和低温的稳定性——例如，军用电线电缆不仅对绝缘材料有许多要求，由绝缘包复的导体，同样要经受热老化、热冲击（电线在最高工作温度下试验，接着立即冷却到 −55℃）和振动等考验。又如铜或铝连铸连轧制杆生产用的铜合金结晶轮，也有类似的要求。

高的抗疲劳性能——例如柔软的电线、电缆，往往要经受重复的弯曲，因此可弯曲寿命也成了关注点之一。

终端接头的连接性——随着连接器和终端接头需求的日益增加，在许多高性能铜合金导体开发中也是追求的。

可焊性和可镀性——所谓可焊性，就是导体的表面要易于被标准焊剂所活化，这点在集成电路等需要连续焊接的场合尤为重视；可镀性指的是导体的表面要易于镀锡或银或镍。

要能加工成细线并达要求的长度，例如，镁铜合金（Cu—Mg），现已用于电气化铁路的大直径承力索和长途通信的引入线，但它难于加工成细线。此外要注意技术经济效果和商品化生产的可行性与现实性。例如，锆铜合金是析出硬化型合金之一，在工艺上需要热处理，如果做成大截面的导体尚需大型的热处理装备，因此与合金有关的价格对使用起着阻碍的作用。

要保证导体生产对铜合金制品质量的连续均匀性和稳定性——导体生产总是连续、高速和大长度进行的，合金元素的加入必须与加入的方法和生产装备相匹配。合金元素的加入量和均匀性是制品质量决定性的因素之一，有的元素属易挥发（如：镁、锡等）元素，如加得不好，使有效合金元素变成了杂质，致使导体产生缺陷；或加入不均，致使导体在整个长度上不均匀、不稳定；或者根本没有加进去，达不到应有的目的。

铜合金导体的线材，除以裸线型式应用外，往往要制成绞线（束线）、编织线、金箔线、特种电线电缆、型材以及镀锡、银、镍后使用，现举例如表 3.3-1 所示。

表 3.3-1 铜合金导体应用举例

制品形式	应用场合举例
绞线（束线）	航空航天、汽车、计算机、电子等线路和电缆；潜水、严格防御和医用设备的控制电缆；易燃性环境中的高性能电线电缆；印制电路上安装电容器、电阻器和二极管时可靠的锡焊连接；高性能军用、航空航天用电缆、电话连接线、电气化铁路用承力索、特种电线电缆等
编织线	扬声器、汽车声频系统、电话线等
金箔线	电话听筒软线、高性能扬声器、刮胡器接线、计算机工业中的接地线、真空清洁工业、汽车声频电路、广播网、高性能高保真电路等
型材	梯排和异形排、电气化铁路和轨道交通用接触线等
圆单线	高速切割用线、特种电线电缆等

1.2 合金元素的选择

要达到铜合金导体预想的设计要求，选择合金元素并配以合适的工艺和装备是决定性的。

导体的重要特征之一电导率，一般铜合金导体也不例

外。随着铜中添加元素、元素添加量（见图 3.3-1）和添加元素在铜中固溶度的增加，则铜合金导体的电导率下降。添加元素如银、镉、镁、锰等均属固溶元素，加入铜后形成固溶强化型铜合金。由于合金元素完全固溶于铜而形成单一相，这些合金的强度比纯铜高，但电导率低。用轧制和拉伸等加工手段（冷作硬化）可以进一步增加强度，但随着冷加工量的增加会降低其电导率。添加元素如铬、锆等属固溶析出强化型元素，例如 PD135（镉铬铜）就是固溶析出强化型铜合金，在较低的温度下有类似的溶解度，但在较高的温度下固溶度就增加，这种溶解度与温度之间的关系，构成了析出硬化的基础。这些合金先加热达到高温，此时大多数或所有合金元素溶解于铜，然后被快速冷却（淬火）。由于急冷基本上冻结了高温的组织，形成过饱和固溶体。在这种固溶化的条件下，合金是软的，并具有在指明的成分下最低的电导率。然后，合金在合适的温度下加热（时效处理），以便有控制地将第二相颗粒从铜基体中析出来，冷加工能进一步提升析出硬化型合金的强度。

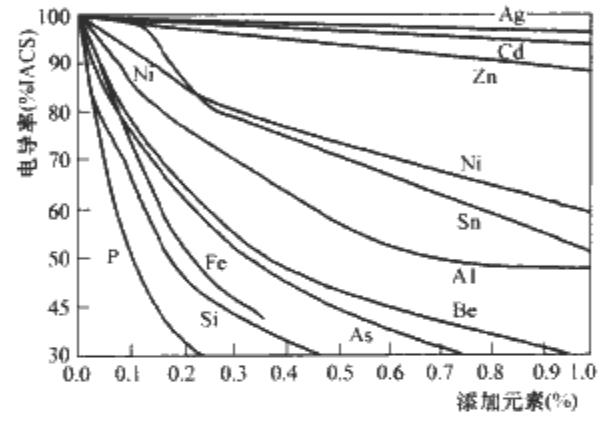


图 3.3-1　各种添加元素对铜电导率的影响

弥散强化是增加铜合金强度的另一种手段，可以用各种手段引入不易溶于铜基体的稳定颗粒。这些颗粒可通过类似于析出硬化型合金中第二相颗粒的机理来增加强度。由于弥散颗粒不溶解于铜基体，所以对导电性能可产生最小的影响，不需要对合金进行固溶化处理和时效处理。与大多数金属一样，可通过冷加工来控制弥散硬化金属的机械性能。

铜合金的冶金决定了它的性能，铜合金可以铸成要求形状的锭坯和铸条，它可以连续浇铸。近年来，用合金的粉末或称喷射冶金技术，可以使合金制成导体，但仅能进行通常的成形浇铸，这种铸件不能加工成线杆或线。用通常的金属铸造技术来生产铜合金杆，当合金中含有挥发性元素时常常难于保持熔体的化学成分。然而，这种很少的挥发性元素又往往使用在高性能的铜合金中。当冷却时保持合金的均匀性和对杂质的清除，都会有利拉线，并影响最终的机械性能。

制作铜合金导体用的基体铜，可影响成分的控制和特定的应用。为保证电导率，在生产过程中要严防外来杂质，严防内在杂质的含量。基体铜可以是低氧韧铜、无氧铜和脱氧铜，但对不同的合金和应用，应有不同的选择趋向。例如：锆铜和铬、锆、镁铜要以无氧铜为基体，而且熔化和浇铸是在保护性气氛下进行的，以防止氧化和使制品的成分尽量保持在控制的范围内。它都可采用半连续浇铸，以保证获得更均匀、完好的制品。又如，铜合金导体，在使用中如与含氢的气氛相接触，应选用无氧铜作为基体铜。

1.3　铜合金导体的加工工艺

铜合金导体已用于生产的加工工艺约有下列几种：上引法连续制杆—冷轧（或巨拉）—拉线法；上引法连续制杆—“康仿”连续挤压—冷轧—拉线法；连铸连轧制杆—拉制法；半连续浇铸—轧制—拉制法；挤压—拉制法。

用固溶析出强化型合金制造铜合金接触线，因为该种线截面大、长度长、所需杆坯质量大，首先遇到的是连续制杆技术，另外是大型热处理炉的装备问题，至今还没有获得进展。

用定向凝固制造技术，制备纤维增强的自生复合铬铜（Cu—Cr）接触导线，在我国进行了试验，结论是：Cu—Cr 合金具备制备自生复合材料的基本条件。采用定向凝固连铸工艺可形成 α—Cu 相柱状晶及 Cr 相质点沿胞（枝）晶界顺凝固方向纤维状排列的有序自生复合组织；Cr 相以纤维状有序排列在 α—Cu 柱状晶晶界的自生复合组织中，柱状晶 Cu 相起着导电作用，而纤维状 Cr 相质点起到了强化作用，从而把导电功能与强化功能有机地复合在一起，表现出良好的综合性能；最佳工艺参数是：加入 0.64%Cr 的 Cu—Cr 合金在 $G_L=60℃/cm$、$V=3.2mm/min$ 工艺条件下经定向凝固后，再经拉伸变形（变形率 50%），其综合性能指标 M 值达到了 $18.3\times10^6\times MPa^2\%$，[$M$ 值是日本对接触线在大量实际运行的基础上，得出的接触线的综合性能指标为 $M=\sigma_b^2\sigma_T$，即以强度（σ_b）的平方和电导率（σ_T）之积作为衡量接触线总体综合性能优劣的指标]（简称 M 指标）。对这种定向凝固连续制造技术在接触线生产中的应用，其实用性和技术经济效果，有待深入研究。不过，如能用此种方法制杆，然后通过拉制制造细的和微细的高性能铜合金线或许更有希望。

2　铜合金导体的标准和公司牌号

铜合金导体无国际性组织的标准，也无完整的工业先进国家的标准可相应对照；有不少公司有自己铜合金导体的牌号，但出于商业竞争，往往不公开合金的成分和制造工艺，在军工、航空航天、电子、汽车等应用领域往往在产品标准中对铜合金导体的性能有所规定，但对铜合金导体的材料无明确的规定。因此，对铜合金导体的开发和生产除基本性能外，还要针对不同应用的特殊要求来进行。

2.1　美国铜合金导体国家标准

AST MB105—2000《导体用硬拉铜合金线》对铜合金导体的编号、相应的 UNS 铜合金编号、成分和基本性能（电导率和力学性能）作了规定（见表 3.3-2～表 3.3-6）。

表 3.3-2　铜合金导体编号和相应的 UNS 铜合金编号

铜合金号（按电导率递增编号）	铜合金号（相应的 UNS 铜合金编号）	电阻率 ($\Omega\cdot mm^2/m$)	电导率 (%IACS)
合金 8.5	C65 100	0.202 84	8.5
合金 13	C51000	0.132 63	13
合金 15		0.114 94	15
合金 20		0.086 207	20
合金 30	C50700	0.057 471	30
合金 40		0.043 103	40
合金 55	C16500	0.031 348	55
合金 74	C19600	0.023 299	74
合金 80	C16200	0.021 552	80
合金 85	C16200	0.020 284	85

ASTMB624—1999《电子用高强度高导电铜合金》对电子用高强度高导电圆铜合金线的线径范围规定为从 0.079～1.829mm，该种线用于电子连接线（Hook up Wire）。线的

最小抗拉强度为 414MPa，最小电导率为 85%IACS（在 20℃下）。在标准中对导体用的材料和成分未作规定，除非供、需双方在合同中议定。对不同线径的最小拉断力、伸长率和最大电阻的规定见表 3.3-7。

美国军用 MIL－W－82598（OS）《镉铜线》规定了 AWG23 号（线径 0.573mm）镉铜线的最小抗拉强度为 586MPa，最小电导率为 80%IACS，该种线在硬状态下使用。

表 3.3-3　　铜合金导体编号、相应的 UNS 编号和化学成分

铜合金号	UNS 铜合金编号	化学成分，不大于（%）								
		Cu+Ag 不小于	P	Mn	Fe	Cd	Si	Pb	Sn	Zn
合金 8.5	C65100	余量		0.7	0.8		0.8～2.0	0.05		1.5
合金 13	C51000	余量	0.03～0.35		0.10			0.05	4.2～5.8	0.30
合金 30	C50700	余量	0.30		0.10			0.05	1.5～2.0	
合金 55	C16500	余量			0.02	0.6～1.0			0.5～0.7	
合金 74	C19600	余量	0.25～0.35		0.9～1.2					0.35
合金 80 合金 85	C16200	余量			0.02	0.7～1.2				

表 3.3-4　　铜合金导体中元素的最大含量

元　素	成分（%）	元　素	成分（%）
P max	0.35	Al max	3.50
Mn max	0.75	Sn max	5.00
Fe max	1.20	Zn max	10.50
Cd max	1.50	Cu min	89.00
Si max	3.00	上列元素总量（最小）	99.50

表 3.3-5　　铜合金导体编号和合金组成元素

铜合金号	合金组成元素	铜合金号	合金组成元素
8.5	Cu，Si，Fe	20	Cu，Sn
	Cu，Si，Mn	30	Cu，Sn
	Cu，Si，Zn		Cu，Zn，Sn
	Cu，Si，Sn，Fe	40	Cu，Sn
	Cu，Si，Sn，Zn		Cu，Sn，Cd
13	Cu，Al，Sn	55	Cu，Sn，Cd
	Cu，Al，Si，Sn	74	Cu，Fe，P
	Cu，Si，Sn	80	Cu，Cd
15	Cu，Al，Si	85	Cu，Cd
	Cu，Al，Sn		
	Cu，Al，Si，Sn		
	Cu，Si，Sn		

注　在表 3.3-5 中合金组成元素的最大值，仅指在本表中的一个元素而已。

表 3.3-6　　铜合金导体的最小抗拉强度

线径（mm）	伸长率（%）L_0=250mm	最小抗拉强度（MPa）									
		合金 8.5	13	15	20	30	40	55	74	80	85
7.35～0.81	2.2～0.9	672.2～851.5	706.7～886.0	755.0～930.8		510.2～744.8	508.1～655.0	524.0～686.0	510.2～651.6	496.4～635.7	472.3～604.0

注　接头——在杆和线中的接头，在最后拉制前可以进行，但接头的强度应不小于表中规定的最小值的 95%。

表 3.3-7　　抗拉性能和电阻

线　径（mm）	最小拉断力（N）	最小伸长率（%）L_0=254mm	20℃最大电阻（Ω/km）
1.829～0.079	1065～1.9	9～7	7.88～4410

注　接头——为了加工起见，在必须进行接头时，接头的质量应符合本标准规定的所有要求。

2.2　英国、欧洲铜合金导体国家标准

BS EN 2083：2001《电缆用铜和铜合金导体航天系列制品》规定，该标准应用于截面为 0.15～107mm² 的绞制导线，导体由高导电退火的韧铜（IEC 28）或铜合金的股线绞制而成。标称截面为 0.15mm² 和 0.25mm² 的导体应由铜合金制成，股线可不镀和镀锡或镀银或镀镍，镀层的厚度对银不低于 1.0μm，对镍不低于 1.3μm，当镀锡时厚度应符合由 EN 3475—506 和 EN 3475－507 规定的要求。对铜合金导体的材料成分不作规定，但铜合金导体应具有下列性能：最小电导率 70% IACS；最小抗拉强度 350MPa；最小伸长率 6%。

导线应无接头。构成导线的每根股线可以有钎焊或黄铜焊接头。对线径 0.25mm 及以上的股线应采用对焊接头。

2.3　中国铜合金导体国家标准

GJB 1640—1993《航空航天用电线电缆导体品种及截面系列》规定，该标准适用于航空航天用电线电缆成品中的导体。铜合金导体用于要求机械强度较高的场合，并采用同心绞合型式，导体可以镀锡或银或镍，它们的长期工作温度分别不超过 150℃、200℃和 260℃。对铜合金材料未规定化学成分，但铜合金线应符合下列主要技术性能指标：最小抗拉强度 490MPa；最小电导率 78.51%IACS；最小伸长率 6%（指成品电缆导体的断裂伸长率）。

2.4　铜合金导体公司牌号

为了满足对铜合金导体增加的性能要求，并且要在非常细的线中应用，因此析出强化型铜合金所具有的高强度、高导电和抗软化等综合性能要比固溶强化型铜合金更为优越，尽管它的工艺比较复杂成本也比较高。由于析出强化型合金因强化性质的差异，所以当使用与之配合的高温绝缘时，因烧结（固化）温度的影响可使铜合金线芯退火，从而必须考

虑它的软化特性。

析出强化型铜合金由一个及以上的添加元素所组成。这些元素在高温下形成固溶体，在较低的温度下固溶度降低。合金在固溶体范围内淬火形成过饱和的亚稳定相，接着通过时效使得第二相从基体上析出。这些析出相可起到阻碍位错运动的作用，但如果继续热老化（时效），这种析出物将聚集和生长，减少阻碍位错运动的能力，从而将导致强度的损失。因为强化程度受到析出物尺寸和分布的影响，所以对热的作用是相当敏感的，并且热效应是具有积累性的，因此在铜合金线芯包覆绝缘等整个加工过程中应认真考虑热作用的影响。随着高温绝缘的应用，为了保持线芯的性能，控制好烧结（固化）处理的温度和时间是很重要的。绝缘烧结温度一般在 275～425℃，时间为 30～100s，并且在包覆护套和印字过程中也需要附加固化处理，但这些处理都会影响线芯的最终性能。表 3.3-8 和表 3.3-9 中列举了有关公司析出强化型合金的牌号、成分和主要工艺条件。

CAD162（Cu—Cd）——有好的强度（420MPa，在 10%伸长率下），但它的软化性能比较低，甚至在 250℃，经 1000s 后已经发现稍有软化，在较高的温度下强度的下降已十分迅速。在 400℃，经 100s 的热时效，就致使颇大地软化，由此强度被减小到 300MPa。由于它相对地对热不稳定，所以对各种高温绝缘使用时应对时间和温度的参数进行评价。对 Taflon 绝缘的应用是可能的，因为固化处理必然会引起软化，致使达到超过电线标准的范围。

CAD182（Cu—Cd）——有好的强度（在伸长率 10%下，约 400MPa），但抗软化性能比较低。强度的退化不像 CDA162 那样猛烈，但与 PD135 相比就相当大了，因此使用时要注意选择与它配合使用的高温绝缘材料。

表 3.3-8　　铜合金导体的公司牌号

成分 / 牌号	Cr	Cd	Mg	P	Ag	Fe	Zr	Pb	其他元素	基体铜	其他
CDA 150	—	—	—	—	—	—	0.10～0.20	—	—	—	同 C15000
CDA 162	—	0.7～1.2	—	—	—	0.02	—	—	—	—	同 C16200
CDA 182	0.6～1.2	—	—	—	—	0.10	—	0.05	0.10	—	—
PD 135	0.4	0.4	—	—	—	—	—	—	—	无氧铜	—
CR 155	—	—	0.10（0.08～0.13）	0.06（0.04～0.08）	0.04（0.027～0.10）	—	—	—	—	含银 0.04～0.09	—
C 196	—	—	—	0.3	—	1.0	—	—	—	—	同 C19600
AMZirc	—	—	—	—	—	—	0.15	—	—	无氧铜	熔、铸在保护气氛中进行
AMAX-MZC	0.6	—	0.03	—	—	—	0.10			无氧铜	

表 3.3-9　　有关公司析出强化型铜合金主要工艺条件举例

工艺 / 牌号	热加工	固溶（℃）	时效（℃）	析出（℃）	备　注
PD135	—	925～960℃，5～120min；快速淬火	455～565℃，15～120min	—	接着冷加工，可拉到 0.003 1mm；可反复处理达到要求的性能
CR55	—	不需固溶加热和淬火	—	400℃，3h	用通常的熔化、浇铸和加工设备生产，线可拉到 ϕ0.7mm
C196	挤压状态，有一定量的 Fe 和 P 保持在固溶体中	—	—	450～550℃	线可拉到 0.127mm；带可压到 0.076mm
Amzirc	790～900℃	900～950℃，30～60min，淬火	400～450℃，30min	—	—
Amax-MZC	790～900℃	900～950℃，30～60min，淬火	450～500℃，30min	—	—

PD135——在伸率为 10%～12%下的抗拉强度约为 480MPa，在热处理状态下的平均电导率可达 90%IACS，在 400℃下不软化，450℃、100s 以后强度稍有下降，500℃下虽已有明显的软化，但经 5000s 加热后强度仍可保持在 330MPa。弯曲性能比铜大 20 倍、最细线径可拉到 0.003 1mm，在 100×10^6 负荷循环下疲劳强度为 205MPa，高温蠕变性能可超过通常的铜包钢线，它可以和所有的高温绝缘材料（包括 Taflon）配合使用。正因为它具有高导、高热稳定性和高韧性的综合性能，是这些合金中的佼佼者，所以在航空航天工业、计算机工业中制成绝缘线、扁平电缆和屏蔽系统中使用。

CR155——这种合金不需固溶化加热和淬火，在热加工时不发生析出，只发生在而后的加工退火上。ϕ0.7mm 的线，在 300～400℃下退火 30min 后的软线，其强度为 514～376MPa，而电导率为（85～89）%IACS，耐热性能较好，可在 430℃下短时暴露 1h。此合金只需加入少量 Mg 和 P，所以废料再熔时容易除去，而且可用通常的熔铸和加工设备进行生产。

C196——合金中加入 P，在凝固过程形成 Fe2P，这种金属间化合物对热处理反应迅速，在热挤状态下有一定量的

Fe 和 P 保持在固溶体中。在 450～550℃析出退火后最小电导率可达（76～85）%IACS。C196 强度水平高于 CDA162（Cu—Cd），在类似的减缩率下，相当于 PD135，疲劳强度与 CDA162 类似，电导率低于 CDA162。如果在 300～350℃下连续加热，将比 PD135 和 CDA182（（Cu—Cr）有更猛烈的热影响。C196 可在 100～200℃下连续工作，在要求强度高于纯铜、而电导率为 80%IACS，而且仅需瞬态温度的场合如以 C196 代用镉铜将在价格上是节约的。用通常的拉线技术可拉出 φ0.127mm 的线。

Amzirc 和 Amax—MZC—Amax—MZC 比 Amzirc 具有更多的第二相析出物，因而有明显的强化和硬化效果，在大多数情况下，通过热轧可直接地淬火 Amax－MZC 合金，这样足以去保持合金元素在固溶体中，这可能是因镁的存在致使第二相析出物更加缓慢析出的缘故。φ2.03mm Amzirc 和 Amax-MZC 线的室温性能、强度分别为 441MPa 和 490MPa，电导率分别为 88%IACS 和 76%IACS，这两种合金具有良好的短时高温强度，在 400℃下有良好的蠕变性能。随着温度的增加，电导率从室温下的 90%IACS 降到在 300℃下的 45%IACS。由于它们具有优秀的电导率和高温机械强度，故已在梯排、飞机和导弹、高温电磁线、密封电机绕组、连铸连轧结晶轮等场合使用。由 Amax-MZC 合金制的结晶轮比银铜和铬铜有更好的抗热应力和开裂敏感性，并能保持所需的强度和导热性。

从上所述，在各种高强合金之间显示出在“软化特性”上有颇大的差别，CDA162 和 CDA182 具有好的强度，但热稳定性相对较差。因此，对高温绝缘的选择使用应注意评估；CDA150 相对地有好的热稳定性，但在 Teflon 的固化温度下发现有些软化。PD135 有优秀的热稳定性，它适用于与所有的高温绝缘材料相配合，故在高性能的应用中是可行的。

3 铜合金导体及其应用

3.1 银铜（Cu—Ag）及其应用

Cu—Ag 的二元相图如图 3.3-2 所示。Cu—Ag 组成共晶相图，在共晶温度 780℃时，银在铜中的溶解度为 7.9%，但室温时的溶解度仅 0.1%左右。含银少时，铜合金的电导率（见表 3.3-10）与热导率的下降很小，对塑性的影响也很小，并显著提高铜的再结晶温度和蠕变强度。因银属固溶强化型添加元素，银又容易加入铜中，而且通过冷加工，就可获得需要的制品性能，因此银铜是获得较广应用的电工用铜合金。电工用银铜制品的型式有线材、型材、型线和接触线等。银铜的含银量从 0.03%～7.0%都有不同的用途（见表 3.3-11），以充分利用银铜的高导电性、高强度性和高耐热性。加入银的基础铜根据用途的不同可以是韧铜或无氧铜或脱氧铜。欧洲电工标准 BS EN 13605：2002，对银铜异形材和异形线的形状、材料编号、成分和机、电性进行了比较明确的规定，图 3.3-3 为银铜异形材和异形线的形状，表 3.3-12 为银铜异形材和异形线的代号，编号和特性，表 3.3-13 为化学成分，表 3.3-14 为电导率，表 3.3-15 为力学性能。

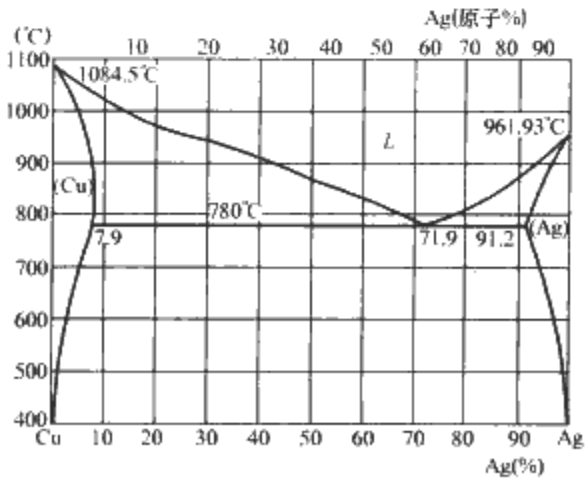


图 3.3-2 Cu—Ag 二元相图

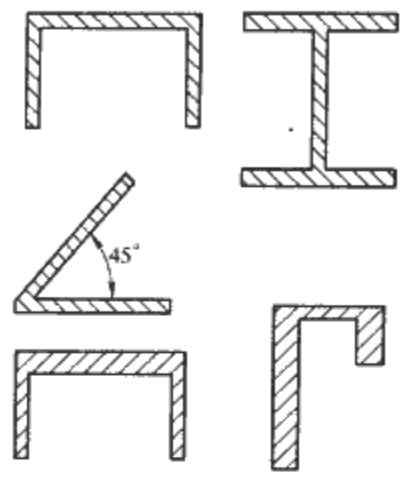


图 3.3-3 银铜异形材和异形线的形状
（另有形状按图加工）

表 3.3-10 铜合金导体的成分和电导率

铜合金	美国 UNS 编号	标称成分（%）	电导率（%IACS）	备注
Cu（OF）	C10200	Cu 99.95	100	A
Cu—Ag	C10400	Ag 0.027	100	A
Cu—Ag	C10500	Ag 0.034	100	A
Cu—Ag	C10700	Ag 0.085	100	A
Cu—Mn—Se	—	Mn 0.002，Se 0.002	100	A
Cu—Te	—	Te 0.3～0.7	94	CW
Cu—Zr—P	—	Zr 0.04～0.10 P 0.01～0.03	94	CW
Cu—Mg—Zr	—	Mg 0.03， Zr 0.03	93	CW
Cu—Zr	C15000	Zr 0.15	93	HTCW
Cu—Cr—Zr	—	Cr 0.04， Zr 0.04	90	HTCW
Cu—Cd	C16200	Cd 1.0	90	HTCW
Cu—P—Co	—	P 0.020， Co 0.0182	85.6	CW
Cu—Cr—Zr—Mg	C18100	Cr 0.8，Zr 0.15， Mg 0.04	85	HTCW
Cu—Mg—P—Ag	—	Mg 0.1～0.12 P 0.04～0.08 Ag ≥0.04	85	CW
Cu—Cr	C18200	Cr 0.9	82	HTCW
Cu—Cr—Zr	—	Cr 0.7，Zr 0.1	82	HTCW
Cu—Sn	—	Sn 0.3	70	CW
Cu—Mg	— —	Mg 0.1～0.3 Mg 0.4～0.7	77 62	CW

注 A－软态；CW－冷加工；HTCW－热处理和冷加工。

表 3.3-11　　银铜合金及其应用

基础铜	银（%）	特　性	应　用
韧铜	0.03 0.08	耐热，高导电	耐热电缆 整流子梯排
	2.0 ～ 2.8	高强度（873～932）MPa 高导电（81.3～83.4）%IACS	海底电缆和海洋勘探电缆用线芯
无氧铜	2.0 4.0 7.0	耐热，高强度，高导电，耐弯曲	小振动的线圈，磁拾音线圈，医疗设备用线缆，声波线圈，话筒线圈，小型马达，NINTENDO 电缆，放电切割用线

表 3.3-12　　银铜异形材及异型线的代号、编号和特性

基础铜	特　性	材料名称	
		代　号	编　号
韧铜 无氧铜 脱氧铜	1. 韧铜(ETP)、无氧铜(OF)和脱氧铜(P)均可生产银铜 2. 银含量≤0.12% 3. 银的影响可增加抗软化性能，并不会明显影响电导率 4. 无氧铜和脱氧铜可避免氢脆；韧铜在含有氢的气氛中，当进行热处理、焊接或铜钎焊时必须特别预防氢脆	CuAg 0.04 CuAg 0.07 CuAg 0.10 CuAg 0.04P CuAg 0.07P CuAg 0.10P CuAg 0.04(OF) CuAg 0.07(OF) CuAg 0.10(OF)	CW0 11A CW0 12A CW0 13A CW0 14A CW0 15A CW0 16A CW0 17A CW0 18A CW0 19A

表 3.3-13　　银铜异形材及异型线的化学成分

材料名称		化学成分（%）							其他元素（见注）	
代　号	编号	元素	Cu	Ag	Bi	O	P	Pb	总量	除外
CuAg 0.04	CW 011A	最小 最大	余量	0.03 0.05	— 0.000 5	— 0.040	— —	— —	— 0.03	Ag，O
CuAg 0.07	CWO 12A	最小 最大	余量	0.06 0.08	— 0.000 5	— 0.040	— —	— —	— 0.03	Ag，O
CuAg 0.10	CWO 13A	最小 最大	余量	0.08 0.12	— 0.000 5	— 0.040	— —	— —	— 0.03	Ag，O
CuAg 0.04P	CWO 14A	最小 最大	余量	0.03 0.05	— 0.000 5	— —	0.001 0.007	— —	— 0.03	Ag，P
CuAg 0.07P	CWO 15A	最小 最大	余量	0.06 0.08	— 0.000 5	— —	0.001 0.007	— —	 0.03	Ag，P
CuAg 0.10P	CWO 16A	最小 最大	余量	0.08 0.12	— 0.000 5	— —	0.001 0.007	— —	 0.03	Ag，P
CuAg 0.04（OF）	CWO 17A	最小 最大	余量	0.03 0.05	— 0.000 5	— —	— —	— —	— 0.006 5	Ag，O
CuAg 0.07（OF）	CWO 18A	最小 最大	余量	0.06 0.08	— 0.000 5	— —	— —	— —	— 0.006 5	Ag，O
CuAg 0.10（OF）	CWO 19A	最小 最大	余量	0.08 0.12	— 0.000 5	— —	— —	— —	— 0.006 5	Ag，O

注　1. 除铜外，其他元素的总量被规定为包括下列元素的总和：Ag，As，Bi，Cd，Co，Cr，Fe，Mn，Ni，O，P，Pb，S，Sb，Se，Si，Sn，Te，Zn。已指明的各元素除外。

2. 基础铜（韧铜）中包括的 Ag，最大值为 0.015%。

3. 如供、需双方同意，在韧铜（ETP）和火法精炼高导电铜（FRHC）中的含氧量允许达到 0.060%。

4. 无氧铜（OF），其材料的氧含量应符合欧洲电工标准 EN 1976 氢脆的要求。

表 3.3-14　　银铜异形材及异型线的电导率

名　称				电导率（%IACS）
材　料		材料状态		
CuAg 0.04 CuAg 0.07	CWO 11A CWO 12A	HO 35	R 200	100
CuAg 0.10 CuAg 0.04（OF） CuAg 0.07（OF）	CWO 13A CWO 17A CWO 18A	HO 65	R 240	98.3
CuAg 0.10（OF）	CWO 19A	HO 80	R 280	96.6
CuAg 0.04P CuAg 0.07P	CWO 14A CWO 15A	HO 35	R 200	98.3
CuAg 0.10P	CWO 16A	HO 65	R 240	96.6
		HO 80	R 280	94.8

表 3.3-15 银铜异形材及异型线的力学性能

名称			尺寸（mm）		力学性能				
材料		材料状态	厚度最大	宽/高最大	硬度		抗拉强度 R_m（MPa）最小	0.2% 屈伏极限 $R_{P0.2}$（MPa）	伸长率 A_{100mm}（%）最小
代号	编号				BH	HV			
		D	50	180	拉制				
CuAg 0.04	CWO 11A	HO35	50	180	最小 35 最大 65	最小 35 最大 70	—	—	—
CuAg 0.07 CuAg 0.10	CWO 12A CWO 13A	R200	50	180	—	—	200	最大 120	25
CuAg 0.04P	CWO 14A								
CuAg 0.07P CuAg 0.10P	CWO 15A CWO 16A	HO65	10	150	最小 65 最大 95	最小 70 最大 100	—	—	—
CuAg 0.04（OF） CuAg 0.07（OF）	CWO 17A CWO 18A	R240	10	150	—	—	240	最小 160	—
CuAg 0.10（OF）	CWO 19A								

注 1. D 材料状态，对拉制的制品不规定机械性能。

2. H 材料状态，用硬度要求的最小值命名材料状态，对这种制品具有强制性的硬度要求。

3. R 材料状态，用抗拉强度要求的最小值命名材料状态，对这种制品具有强制性的抗拉强度、屈伏极限和伸长率的要求。

银铜的力学性能，随着含银量的增加，硬度、抗拉强度明显增加，但伸长率则变化不大（见图 3.3-4）。Cu—0.18Ag 银铜在冷加工率为 60%下，退火 1h 的软化曲线如图 3.3-5 所示。银铜的蠕变性能，如表 3.3-16 所示。

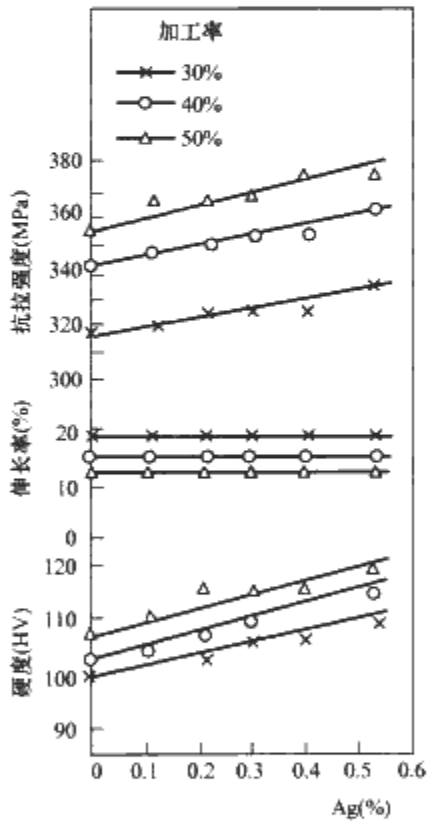


图 3.3-4 含银量与硬度、抗拉强度和伸长率的关系

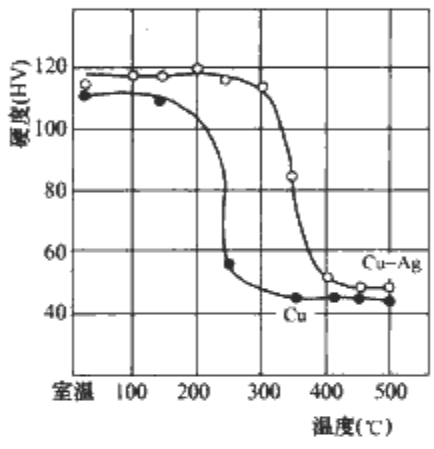


图 3.3-5 Cu—0.18Ag 的软化曲线
（冷加工率 60%，退火 1h）

3.2 锡铜（Cu—Sn）及其应用

Cu—Sn 的二元相图如图 3.3-6 所示。锡铜合金具有高的强度和好的耐弯曲性能，表 3.3-17 示出了锡铜导体的应用场合。锡铜与银铜有类似的作用，因此，以锡节约银，以锡铜替代对环境有污染的镉铜是其中的措施之一，欧洲在电气化铁路的接触线网中也有扩大应用的趋势。锡铜接触线与具有相同机、电性能的镉铜（含 1%Cd）接触线相比，其价格约低 15%。在铜锡（Cu—Sn）合金中加入另一元素铟，组成 Cu—Sn—In 合金在特种电线电缆和放电切割用的电极线中亦有很好的性能和应用。锡在铜中的加入工艺要比加入银难些，因为锡为低熔点金属，如工艺不良将烧损增加且形成的氧化锡有碍进一步深加工和影响线的质量。

表 3.3-16 银铜的蠕变性能

试验温度（℃）	试验应力（MPa）	加工率（%）	长度增加（%）				试验时间（h）
			开始受荷时	1000h 后	5000h 后	试验完毕	
Cu+0.086%Ag							
130	56.2	10	0.005	0.02	—	0.03	4750
	56.2	25	0.005	0.02	—	0.02	4750
	56.2	50	0.005	0.03	—	0.03	4550
	98.4	10	0.015	0.04	0.06	0.08	9800
	98.4	25	0.015	0.05	0.07	0.07	10 200
	98.4	50	0.015	0.06	0.08	0.09	11400
	141	10	0.05	0.12	0.15	0.17	7 200
	141	25	0.04	0.09	0.11	0.12	7200
	141	50	0.035	0.10	0.13	0.13	7250

续表

试验温度（℃）	试验应力（MPa）	加工率（%）	长度增加（%）				试验时间（h）
			开始受荷时	1000h后	5000h后	试验完毕	
Cu+0.086%Ag							
175	56.2	10	0.01	0.04	—	0.06	4850
	56.2	25	0.005	0.04	—	0.05	4900
	56.2	50	0.015	0.04	0.06	0.07	6900
	98.4	10	0.015	0.09	0.12	0.16	12 900
	98.4	25	0.02	0.08	0.10	0.13	12 900
	98.4	50	0.02	0.09	0.14	0.16	12 900
	141	10	0.11	0.24	—	0.38	4900
	141	25	0.04	0.14	0.21	0.26	10 300
	141	50	0.065	0.17	—	0.22	3700
225	56.2	10	0.02	0.09	0.15	0.18	8900
	56.2	25	0.02	0.07	0.11	0.13	8900
	56.2	50	0.01	0.09	0.14	0.18	8900
	98.4	10	0.06	0.20	0.39	0.68	12 900
	98.4	25	0.055	0.16	0.27	0.47	11 500
	98.4	50	0.03	0.20	0.34	0.62	12 900
	141	10	0.25	—	—	1.25	760
	141	25	0.08	0.35	0.76	1.5	9870
	141	50	0.07	0.42	—	1.0	3000
无氧铜+0.072%Ag							
130	98.4	25	0.01	0.06	—	0.06	1550
	141	10	0.04	—	—	0.09	750
	141	25	0.02	0.09	—	0.09	1050
	141	50	0.01	—	—	0.09	750
225	56.2	25	0.02	0.08	—	0.11	3150
	98.4	10	0.04	0.16	—	0.16	1050
	98.4	25	0.05	0.21	—	0.31	3100
	98.4	50	0.03	0.14	—	0.19	3280
	141	25	0.08	0.61	2.43	2.43	5000

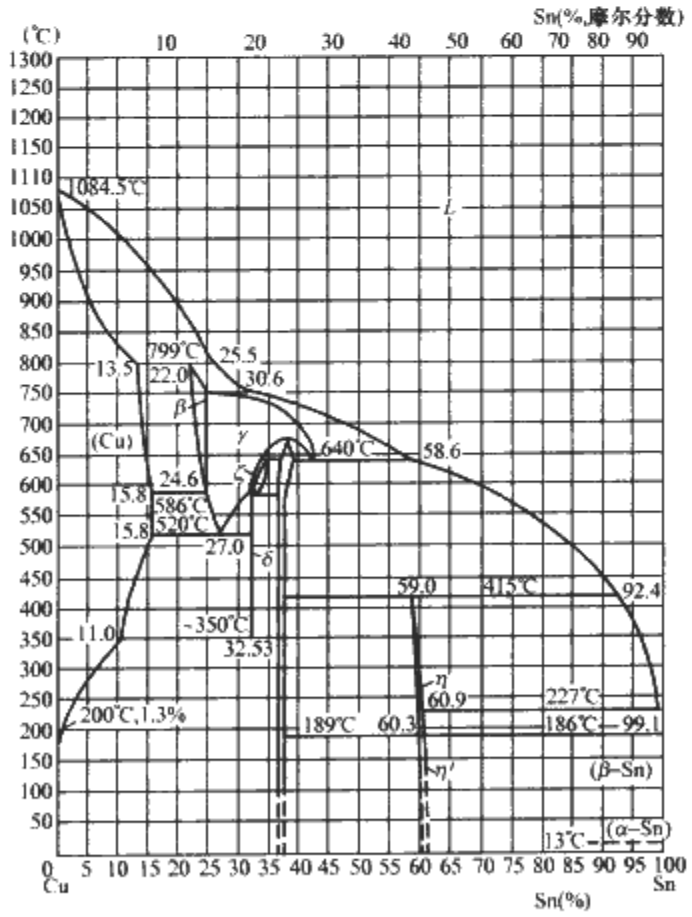


图 3.3-6 Cu—Sn 二元相图

表 3.3-17 锡铜导体的应用场合

基础铜	锡（%）	特 性	应 用
韧铜	0.15	高强度，耐弯曲	医疗设备电缆、ABS电缆、接触线、承力索、吊弦、话筒线圈、工业机器人、声频线圈的移动部件等
	0.20		
	0.30		
	0.40		
	0.60		
	0.70		

3.3 镁铜（Cu—Mg）及其应用

Cu—Mg的二元相图如图3.3-7所示。在共晶温度485℃时镁在铜中的固溶度为0.61%，并随着温度的下降而急剧减少。用作导体的镁铜一般含镁量都在0.7%以下。由于镁铜无时效作用，只能通过冷加工强化，镁铜要实现拉细线目前还尚有困难，但拉制如接触线、承力索用绞线等粗线应是不存在拉线上的困难的。镁的加入可使电导率下降，但抗拉强度可提高，也可提高铜的抗高温氧化能力，也对铜有脱氧的作用。镁属易挥发的元素，它与锡类似，在加入铜中时要注意加入工艺，否则烧损增加，有碍深加工和线的质量。

镁铜导体目前主要用于电气化铁道用的接触线和承力索与吊弦。承力索用的镁铜绞线根据冷加工量（所拉线的直径）、电导率和抗拉强度要求的不同，一般含镁量在

0.2%～0.5%之间。我国铁道行业标准 TB/T 3111—2005《电气化铁道用铜及铜合金绞线》对材料的化学成分，规格、结构、尺寸及性能，型式试验，铜及镁铜单线20℃时的电阻率作了规定，并对绞线的载流量提出了计算值，以供参考（见表 3.3-18～表 3.3-20）。

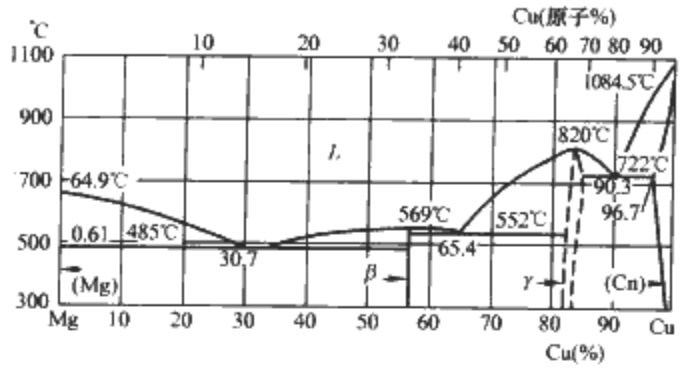


图 3.3-7 Cu—Mg 二元相图

（1）承力索用镁铜的化学主成分见表 3.3-18。

表 3.3-18 承力索用镁铜的化学主成分

材料代号	Cu（%）	Mg（%）	其他杂质总和，不大于
TM	余量	0.1～0.3	0.30
TMH	余量	0.3～0.5	0.30

注 TM—镁铜合金；TMH—高强度镁铜合金。

（2）镁铜承力索的规格、结构尺寸及性能见表 3.3-19。

表 3.3-19 镁铜承力索的规格、结构尺寸及性能

型号	截面积（mm^2）		计算外径（mm）	结构	单线直径（mm）	单线			绞线（计算值）		
						抗拉强度（MPa）不小于		伸长率（%）不小于	拉断力（kN）不小于	直流电阻 20℃不大于（Ω/km）	单位质量（kg/km）
	标称	计算				绞前	绞后				
JT	70	65.81	10.5	1×19	2.10	439	417	0.7	27.45	0.275	599
JT	95	93.27	12.5	1×19	2.50	435	413	0.8	38.54	0.194	849
JT	120	116.99	14.0	1×19	2.80	432	410	0.9	48.01	0.155	1065
JT	150	148.07	15.8	1×19	3.15	428	407	1.0	60.21	0.122	1347
JT	150	147.11	15.8	1×37	2.25	438	416	0.8	61.21	0.123	1342
JTM	10	9.62	4.5	7×7	0.50	520	494	—	4.75	2.437	90
JTM	16	16.26	5.9	7×7	0.65	520	494	—	8.03	1.442	152
JTM	16	16.49	6.2	(3+9)×7	0.50	520	494	—	8.15	1.433	156
JTM	25	24.25	6.3	1×7	2.10	520	494	—	11.98	0.936	220
JTM	35	34.36	7.5	1×7	2.50	520	494	—	16.97	0.660	311
JTM	50	49.48	9.0	1×7	3.00	520	494	—	24.44	0.459	448
JTM	50	48.35	9.0	1×19	1.80	520	494	—	23.88	0.472	440
JTM	70	65.81	10.5	1×19	2.10	520	494	—	32.51	0.346	599
JTM	95	93.27	12.5	1×19	2.50	520	494	—	46.08	0.244	849
JTM	120	116.99	14.0	1×19	2.80	520	494	—	57.79	0.195	1065
JTM	150	147.11	15.8	1×37	2.25	520	494	—	72.67	0.155	1342
JTMH	10	9.62	4.5	7×7	0.50	620	589	—	5.67	3.023	90
JTMH	16	16.26	5.9	7×7	0.65	620	589	—	9.58	1.788	152
JTMH	16	16.49	6.2	(3+9)×7	0.50	620	589	—	9.71	1.778	156
JTMH	25	24.25	6.3	1×7	2.10	618	587	—	14.24	1.161	220
JTMH	35	34.36	7.5	1×7	2.50	618	587	—	20.17	0.819	311
JTMH	50	49.48	9.0	1×7	3.00	608	587	—	28.58	0.569	448
JTMH	50	48.35	9.0	1×19	1.80	618	587	—	28.39	0.585	440
JTMH	70	65.81	10.5	1×19	2.10	618	587	—	38.64	0.430	599
JTMH	95	93.27	12.5	1×19	2.50	618	587	—	54.76	0.303	849
JTMH	120	116.99	14.0	1×19	2.80	608	587	—	67.57	0.242	1065
JTMH	150	147.11	15.8	1×37	2.25	618	587	—	86.37	0.193	1342

注 1. 单线直径偏差对于 JT 型为±1%单线直径，JTM10、JTMH10、JTM16、JTMH16 型为±0.03mm，JTM25—JTM150 型、JTMH25—JTMH150 型为±0.05mm。

2. 拉伸试验试样标距：单线为 250mm，绞线为不小于 5m。试验时，夹具移动速度 20～30mm/min。

3. JT—铜绞线；JTM—镁铜合金绞线；JTMH—高强度镁铜合金绞线。

（3）镁铜承力索的型式试验。

1）振动试验。长度为 6m 的试样，在下列规定的张力条件下，经受振幅 35mm、频率 2～4Hz、2×10^6 次的振动试验（波形为正弦波）后，应无断股。试验额定张力（试验时应考虑接触网张力增量系数：对于 10kN、15kN 为 1.10，20kN 为 1.05）。

1.5kN 适用的绞线型号为：JTM10、JTM16、JTMH10、JTMH16。

2.8kN 适用的绞线型号为：JTM25、JTMH25。

3.5kN 适用的绞线型号为：JTM35、JTMH35。

10kN 适用的绞线型号为：JT70、JTM50、JTMH50。

15kN 适用的绞线型号为：JT95、JT120、JTM70、JTM95、JTM120、JTMH70、JTMH95。

20kN 适用的绞线型号为：JT150、JTM150、JTMH120、JTMH150。

2）轴向疲劳试验。经受振动试验后长度为 6m 的试样，在振动试验规定的张力条件下，经受张力幅为 30%规定张力、频率 1～3Hz、5×10^5 次的轴向疲劳试验（波形为正弦波）后，测其拉断力，其值应不小于表 3.3-19 中规定值的 90%。

（4）镁铜单线 20℃时的电阻率：

铜：不大于 0.017 77Ω·mm^2/m（97.0%IACS）。

镁铜合金（0.2%Mg）：不大于 0.022 40Ω·mm^2/m（77%IACS）。

高强度镁铜（0.5%Mg）：不大于 0.027 78Ω·mm^2/m

(62%IACS)。

(5) 镁铜承力索用绞线的载流量计算值见表 3.3-20。

表 3.3-20　　绞线载流量计算值

型　号	结　构	允许最高工作温度 (℃)	
		95	150
JT70	19/2.10	350	—
JT95	19/2.50	435	—
JT120	19/2.80	505	—
JT150	19/3.15	585	—
JT150	37/2.25	580	—
JTM10	7×7/0.50	95	130
JTM16	7×7/0.65	130	180
JTM16	(3+9) ×7/0.50	135	180
JTM25	7/2.10	165	225
JTM35	7/2.50	205	280
JTM50	7/3.00	260	350
JTM50	19/1.80	255	350
JTM70	19/2.10	310	420
JTM95	19/2.50	385	525
JTM120	19/2.80	445	610
JTM150	37/2.25	515	705
JTMH10	7×7/0.50	85	115
JTMH16	7×7/0.65	120	160
JTMH16	(3+9) ×7/0.50	120	160
JTMH25	7/2.10	150	200
JTMH35	7/2.50	185	250
JTMH50	7/3.00	235	315
JTMH50	19/1.80	230	310
JTMH70	19/2.10	280	380
JTMH95	19/2.50	345	475
JTMH120	19/2.80	400	545
JTMH150	37/2.25	465	635

注　1. JTM 型和 JTMH 型绞线在 95℃栏内的载流量值为该给定工作温度下的计算值。

2. 载流量计算条件为环境温度 40℃、风速 0.5m/s、日照强度 1000W/m²。

根据报道，在镁铜中加入适量的稀土（总含量为 98.5%的混合稀土）可用于制造接触线。Cu—(0.2～0.45)%Mg 在隔绝空气的条件下加入 (0.05～0.25)%RE (La+Ce) 稀土，用连铸连轧法制造 φ20.0mm 的杆，再经冷轧制成接触线，其抗拉强度为 500MPa，电导率为 68% IACS，软化起始温度为 385℃。

3.4　铜合金接触线及其在电气化铁道和城市轨道交通中的应用

我国的国民经济在快速发展，铁道要先行，铁路要提速再提速；为了减轻城市交通的塞车压力，城市轨道交通也在迅速发展，矿山开发和电气化运输都需要接触线，这些都带动了接触线的发展，也使接触线的研究开发成为关注的热点。随着电气化运输向高速、重载方向发展，对接触线在技术性能上提出了更高的要求，之前一直沿用的铜接触线已不能满足要求，采用高性能的铜合金接触线将成为主流方向之一。高性能接触线要求高强度、高导电、高耐热、高耐磨、高耐振和易于回收。对这种铜合金接触线，前苏联采用的是低合金铜，在欧洲采用 Cu—Cd、Cu—Cd—Sn、Cu—Mg、Cu—Ag 和 Cu—Sn，在日本采用 Cu—Ag、Cu—Sn 和 Cu—Cr—Zr 合金。

(1) 我国铁道部铜合金接触线标准。TB/T 2809—2005《电气化铁道用铜及铜合金接触线》对化学主成分、机械性能、电气性能和型式试验作了规定，并对接触线的载流量提出了推荐值（见表 3.3-21、表 3.3-22、表 3.3-23、表 3.3-24）。

1) 化学主成分见表 3.3-21。

2) 力学性能见表 3.3-22。

表 3.3-21　　化学主成分

铜及铜合金类别	Cu (%)	Ag (%)	Mg (%)	Sn (%)	Bi (%)	O (%)	Pb (%)	P (%)	其他杂质总和 ≤ (%)
铜	99.90	—	—	—	≤0.000 5	≤0.030 0	≤0.005 0	—	0.03
铜银合金	余量	0.08～0.12	—	—	≤0.000 5	≤0.030 0	—	—	0.03
铜镁合金 (0.2%Mg)	余量	—	0.1～0.3	—	—	—	—	≤0.01	0.10
铜镁合金 (0.5%Mg)	余量	—	0.4～0.7	—	—	—	—	≤0.01	0.10
铜锡合金	余量	—	—	0.15～0.55	—	—	—	—	0.10

注　铜类中，无氧铜的铜含量为 99.95%，氧含量≤0.003%。

表 3.3-22　　力学性能

型号	抗拉强度 (MPa) 不小于	拉断力，不小于 (kN)		伸长率 (未软化) 不小于 (%)	扭转圈数 (至断开) 不小于	反复弯曲（至断裂）		卷　绕	
		未软化	软化后			弯曲半径 (mm)	次数 不小于	卷绕直径	圈数 不小于
CT85	375	32.25	—	3.0	5	30	6	1d	3
CT110	360	39.96	—	3.0	5	30	6	1d	3
CT120	360	43.56	—	3.0	5	30	6	1d	3
CT150	360	54.36	—	3.0	5	30	6	1d	3
CTA85	365	31.39	28.25	3.0	5	30	6	1d	3
CTA110	350	38.85	34.96	3.0	5	30	6	1d	3
CTA120	350	42.35	38.12	3.0	5	30	6	1d	3
CTA150	350	52.85	47.56	3.0	5	30	6	1d	3

续表

型号	抗拉强度（MPa）不小于	拉断力，不小于（kN）		伸长率（未软化）不小于（%）	扭转圈数（至断开）不小于	反复弯曲（至断裂）		卷绕	
		未软化	软化后			弯曲半径（mm）	次数 不小于	卷绕直径	圈数 不小于
CTAH85	375	32.25	29.02	3.0	5	30	6	1d	3
CTAH110	360	39.96	35.96	3.0	5	30	6	1d	3
CTAH120	360	43.56	39.20	3.0	5	30	6	1d	3
CTAH150	360	54.36	48.92	3.0	5	30	6	1d	3
CTM110	440	48.84	43.96	3.0	5	30	6	2d	3
CTM120	430	52.03	46.83	3.0	5	30	6	2d	3
CTM150	420	63.42	57.08	3.0	5	30	6	2d	3
CTMH110	500	55.50	49.95	3.0	5	30	6	2d	3
CTMH120	490	59.29	53.36	3.0	5	30	6	2d	3
CTMH150	470	70.97	63.87	3.0	5	30	6	2d	3
CTS110	430	47.73	42.96	3.0	5	30	6	2d	3
CTS120	420	50.82	45.74	3.0	5	30	6	2d	3
CTS150	420	63.42	57.08	3.0	5	30	6	2d	3

注 1. 拉伸试验速度 20～30mm/min，试样标距为 250mm，拉断力是接触线截面积为计算值时应达到的值。

2. 试样加热到（300±5）℃保温 2h 后自然冷却，称为软化。

3. 扭转试验速度为 15～20r/min，单方向扭转，试样标距为 250mm。

4. 弯曲试验应首先小圆弧面向内弯曲，试验速度应不大于 60 次/min。

5. d 为所进行卷绕试验的接触线的直径，大圆弧面向内卷绕，试样应无裂纹、起皮、开裂，试验速度不大于 10r/min。

6. CT—铜接触线，CTA—银铜合金接触线，CTAH 高强度银铜合金接触线，CTS—锡铜合金接触线，CTM—镁铜合金（0.2%Mg）接触线，CTMH—高强度镁铜合金（0.5%Mg）接触线。

3）电阻率见表 3.3-23。

表 3.3-23 电阻率

接触线型号（不含规格）	电阻率，20℃（Ω·mm²/m）
CT	0.017 77（97%IACS）
CTA、CTAH	0.017 77（97%IACS）
CTM	0.022 40（77%IACS）
CTMH	0.027 78（62%IACS）
CTS	0.023 95（72%IACS）

4）型式试验。

a. 振动试验。长度为 6m 的试样，在下列规定的张力条件下，经受振幅 35mm、频率 3～5Hz、2×10^6 次的振动试验（波形为正弦波）后，应无断裂。试验额定张力（试验时应考虑接触网张力增量系数：对于 8.4kN、10kN、15kN 为 1.10，对于 20kN、25kN 为 1.05）：

8.4kN 适用的接触线型号为：CT85、CTA85、CTAH85。

10kN 适用的接触线型号为：CT110、CT120、CTA110、CTAH110。

15kN 适用的接触线型号为：CT150、CTA120、CTAH120、CTM110、CTMH110、CTS110。

20kN 适用的接触线型号为：CTA150、CTAH150、CTM120、CTM150、CTMH120、CTS120、CTS150。

25kN 适用的接触线型号为：CTMH150。

b. 轴向疲劳试验。经受振动试验后长度为 6m 的试样，在振动试验规定的额定张力条件下，经受张力幅为 30%额定工作张力、频率 1～3Hz、5×10^5 次的轴向疲劳试验（波形为正弦波）后，从中截取 3 个标准试样，测其拉断力（未软化），其任一值应不小于表 3.3-22 中规定值的 95%。

5）铜及铜合金接触线的载流量推荐值见表 3.3-24。

表 3.3-24 载流量推荐值

接触线规格	持续载流量（A）										
	工作温度 95℃						允许最高工作温度 150℃				
	CT	CTA	CTAH	CTM	CTMH	CTS	CTA	CTAH	CTM	CTMH	CTS
85	410	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
110	480	480	480	450	410	380	650	650	640	570	570
120	510	510	510	480	430	410	690	690	680	610	600
150	580	580	580	550	490	470	800	800	780	700	690

注 1. 铜接触线（CT 型）的允许最高工作温度为 95℃。

2. 计算条件为环境温度 40℃，风速 0.5m/s，日照强度 1000W/m²。

（2）欧洲电工铜合金接触线标准。欧洲电工标准 prEN 50149《铁路用铜和铜合金接触线》，对接触线的品种、化学主成分、机电性能和选择性试验项目作了规定。

1）材料的名称和化学主成分见表 3.3-25。

2）材料的电气性能见表 3.3-26。

3）材料的抗拉强度和伸长率见表 3.3-27。

4）接触线的选择性试验项目包括反复弯曲试验、扭转试验和卷绕试验。

反复弯曲试验——按 ISO 7801 标准执行，弯曲最少 6 次，芯棒的弯曲半径为 30mm，试件长 200mm，弯曲可用手操作。

扭转试验——试验的对象是双沟形接触线的样品和有接头的样品。试件标距 250mm，扭转速度 15～20r/min，扭转达 5 次，用肉眼检查，应不出现裂纹、起皮、龟裂和发纹。

卷绕试验——卷绕沿滑接面（大面）进行，芯棒直径同接触线的直径，绕 3 个连续的 360°，用肉眼检查应不出现裂纹、起皮、龟裂、发纹。

表 3.3-25　　材料名称和主成分

材　料	主　成　分
标称强度高导电铜	Cu—ETP（韧铜）、Cu—FRHC（火法精炼高导电铜、Cu—HCP（磷脱氧高导电铜）、Cu—OF（无氧铜）
银铜合金	Cu—Ag 0.1
镉铜合金①	Cu—Cd 0.7、Cu—Cd 1.0
镁铜合金	Cu—Mg 0.4、Cu—Mg 0.7
锡铜合金	Cu—Sn 0.4

① 某些国家如丹麦、瑞士规定限制使用镉铜合金。

表 3.3-26　　材料的电气性能

材　料	电导率（%IACS）
Cu—ETP、Cu—FRHC、Cu—HCP、Cu—OF	97.0
Cu—Ag 0.1	96.53
Cu—Cd 0.7	86.0
Cu—Cd 1.0、Cu—Sn 0.4	80.0
Cu—Mg 0.4、Cu—Mg 0.7	62.0

表 3.3-27　　材料的抗拉强度和伸长率

材　料	标称截面积（mm^2）	伸　长　率		最小抗拉强度（MPa）
		最小（%）	最大（%）	
标称强度高导电铜 Cu－ETP Cu－FRHC Cu－HCP Cu－OF	80	3	10	355
	100			355
	107			350
	120			330
	150			310
高强度高导电铜 Cu－ETP Cu－FRHC Cu－HCP Cu－OF	80	3	8	373
	100			373
	107			358
	120			358
	150			358

续表

材　料	标称截面积（mm^2）	伸　长　率		最小抗拉强度（MPa）
		最小（%）	最大（%）	
银铜 Cu—Ag 0.1	80	3	10	365
	100			360
	107			350
	120			350
	150			350
镉铜 Cu—Cd 0.7	80	2	7	441
	100			431
	107			431
	120			431
	150			431
镉铜 Cu—Cd 1.0	80	2	7	456
	100			446
	107			446
	120			446
	150			446
镁铜 Cu—Mg 0.4 Cu—Mg 0.7	10	3	—	510
	107	4		500
	120	5		490
锡铜 Cu—Sn 0.4	100	3	7	450
	107			430
	120			420
	150			420

表 3.3-28　　120mm^2 铜、银铜和镁铜接触线抗拉强度与温度的关系

温度（℃）／抗拉强度（MPa）／线种	电导率 20℃（%IACS）	温度（℃）										强度转折时的温度（℃）
		20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
铜	100	404	400	395	377	258	253	—	—	—	—	180
银铜（0.1%Ag）	99.1	395	395	395	395	387	377	265	239	—	—	345
镁铜（0.4%Mg）	71.6	469	469	458	446	444	419	402	334	290	—	385
镁铜（0.6%Mg）	68.1	503	503	503	490	485	465	450	345	313	302	385

表 3.3-29　　接触线的化学主成分

名　称	代号	金属成分（%）			特　征
		Cu	Ag	Sn	
双沟形硬拉铜接触线	GT	100	—	—	高导电
双沟形硬拉银铜接触线	GT—AG	余量	0.2	—	高耐热
双沟形硬拉锡铜接触线	GT—Sn	余量	—	0.3	高耐热、高耐磨
双沟形析出强化型铜—铬—锆接触线	GT—PHC	大于 99.2	铬	锆	高耐热、高强度、高耐磨

注　GT—AG、GT—Sn 和 GT—PHC 允许运行速度分别为 250km/h 和大于 300km/h。

表 3.3-30 接触线的基本特性

代 号		截面积 (mm^2)	计算截面积 (mm^2)	线密度 (kg/m)	张力 (kN)	抗拉强度 (MPa)	电导率 (%)	电阻 (Ω/km)	热膨胀系数 ($10^{-6}℃^{-1}$)
GT		110	111.1	0.987 7	38.2	344	97.5	0.159	17
		170	170.0	1.511	57.8	340	97.5	0.104	17
GT—AG		110	111.1	0.987 7	40.2	362	97.0	0.160	17
		170	170.0	1.511	58.8	346	97.0	0.105	17
GT—Sn		110	110.8	0.982	40.2	363	70.0	0.222	17
		170	169.7	1.506	58.8	347	70.0	0.145	17
GT-PHC	高强度	110	111.1	0.991	59.0	531	76.0	0.204	17
	高导电	110	111.1	0.991	53.0	477	80.0	0.194	17
	高强度	170	170	1.516	86.7	510	76.0	0.133	17
	高导电	170	170	1.516	78.5	462	80.0	0.127	17

镁铜的耐热性明显优于银铜，但电导率则比银铜差，表 3.3-28 和图 3.3-8 示出了 120mm^2 铜、银铜和镁铜接触线抗拉强度和电导率的关系。

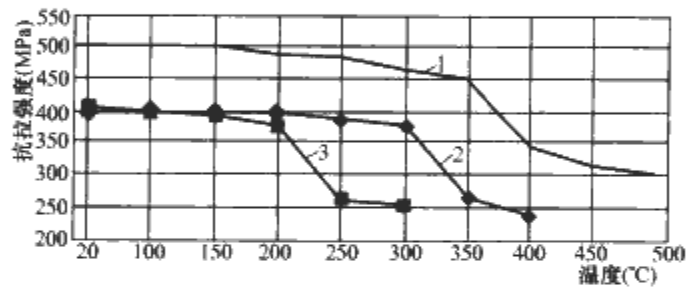


图 3.3-8 120mm^2 铜、银铜和镁铜接触线抗拉强度与温度的关系

1—Cu—Mg (0.6%)；2—Cu—Ag (0.1%)；3—Cu

(3) 日本三菱电线工业株式会社的铜合金接触线。日本三菱电线工业株式会社接触线的品种、材料化学主成分、基本特性，如表 3.3-29、表 3.3-30 所示。图 3.3-9 和图 3.3-10 分别示出了 GT、GT—AG 和 GT—Sn 的振动疲劳特性和软化特性。图 3.3-11 示出了在长期加热后 GT 和 GT—Sn 的软化特性，由此确定 GT 和 GT—AG、GT—Sn 的允许工作温度分别为 90℃和 150℃。根据允许工作温度，计得允许连续载流量如表 3.3-31 所示。根据 GT—Sn 的抗摩擦特性约为 GT 和 GT—AG 的 3/4，由此在允许的磨损高度下进行比较，GT—Sn 接触线的寿命约比 GT 和 GT—AG 接触线长 1.4 倍。根据 GT、GT—AG 和 GT—Sn 的产品价格、使用寿命、安装费用等综合经济比较 GT—Sn 的成本最低。

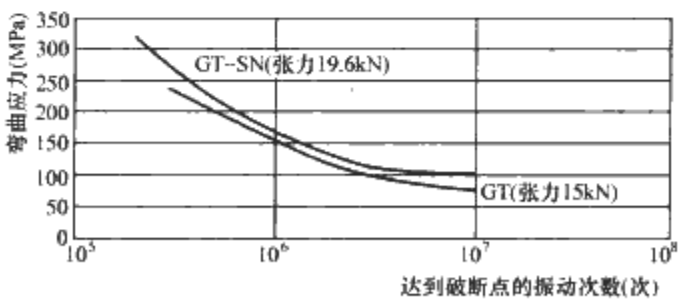


图 3.3-9 GT、GT—AG 和 GT—Sn 接触线的振动疲劳特性（GT—AG 处于 GT 和 GT—Sn 之间）

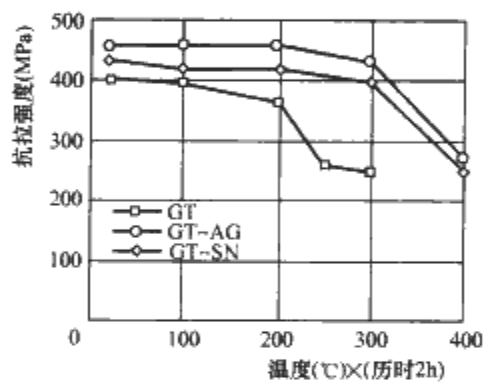


图 3.3-10 GT、GT—AG、GT—Sn 的软化特性

表 3.3-31 允许连续载流量 A

截面积和允许温度		GT	GT—AG	GT—Sn
截面积	允许温度	90℃	150℃	150℃
110mm^2	新线	438	674	570
	磨蚀到 7.5mm	321	488	413
170mm^2	新线	576	897	760
	磨蚀到 8.5mm	382	586	496

注 计算条件：大气温度 40℃，风速 0.5m/s，阳光量 0.1W/cm^2，表面发射 η=0.9，频率 50Hz。

GT—PHC 接触线，在无氧铜中加有铬和锆，属析出强化型导线，它的制造过程包括铬锆铜杆→冷加工→剥皮→冷加工→析出处理→冷加工→成品接触线等工序。据报道，此种线自 1993 年短距离使用至今未出现任何技术问题，适于在时速 300km 及以上的电气化铁道上应用。PHC 接触线的技术特点、110mm^2 和 170mm^2 GT—PHC 和 GT—Sn、GT 特性的比较如表 3.3-32 和表 3.3-33 所示，从中可以看出 GT—PHC 的拉断力和抗拉强度特性优于 GT 和 GT—Sn，这点在高速铁道上应用是很重要的因素。GT—PHC 线抗摩擦特性与 GT 和 GT—Sn 线相比分别约为 35%和 70%，由此在允许的磨损高度下进行比较，GT—PHC 接触线的寿命约比 GT 线和 GT—Sn 线分别长 2.6 倍和 1.7 倍。GT—PHC 接触线的高温强度、软化特性和振动疲劳特性如图 3.3-12、图 3.3-13 和图 3.3-14 所示。根据图 3.3-12 和图 3.3-13 确定接触线的允许温度 GT 为 90℃、GT—AG 和 GT—PHC 为 150℃，从计得 GT—PHC 的允许载流量如表 3.3-34 所示。GT—PHC 与

GT—Sn 在同样的商业运行的线路上经 919 天的验证试验（见图 3.3-15），其结果 GT—PHC 的受磨体积约为 GT—Sn 的一半，这点与抗摩擦特性的结果是一致的。GT—PHC 的安装效果与 GT—Sn 是一样的，在安装时不会遇到困难。根据对接触线的磨损、寿命、材料价格和安装费进行综合比较，其结果如表 3.3-35 所示。

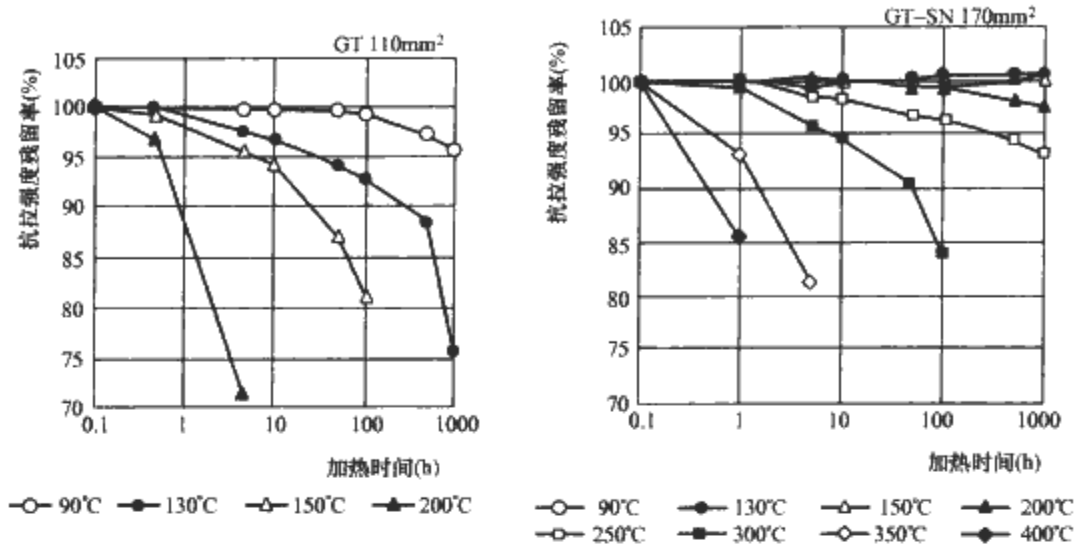


图 3.3-11　在长期加热后 GT、GT—Sn 的软化特性（GT—AG 的特性几乎等于 GT—Sn）

表 3.3-32　　GT—PHC 接触线的技术特点

性　能	特　点
抗拉强度	大于 450MPa
电导率	等于或高于 GT—Sn
耐热性	软化温度大于 400℃，比 GT—Sn 高约 200℃
抗摩擦	比 GT 和 GT—Sn 小 50%
耐腐蚀	等于纯铜
回收	易于回收，因为铜含量大于 99.2%

表 3.3-33　100、170mm² GT—PHC、GT—Sn、GT 接触线特性比较

性能	单位	线截面积 (mm²)	GT-PHC 高强度	GT-PHC 高导电	GT-Sn —	GT —
最小拉断力	kN	110	59.0	53.0	40.2	38.2
		170	86.7	78.5	58.8	57.8
最小电导率	%IACS	110	76.0	80.0	70.0	97.5
		170	76.0	80.0	70.0	97.5
最小伸长率 (L=250mm)	%	110	2.0	2.0	2.8	3.0
		170	2.4	2.4	3.2	3.4
标准质量	kg/km	110	991.0	991.0	982.0	987.7
		170	1516	1516	1506	1511
抗拉强度	MPa	110	531	477	364	344
		170	510	462	347	340
电阻	Ω/km	110	0.204	0.194	0.223	0.159
		170	0.133	0.127	0.145	0.104

表 3.3-34　　允许连续载流量　　A

截面积和允许温度		GT	GT—AG	GT—Sn	GT—PHC
截面积 (mm²)	允许温度 (℃)	90	150	150	150
110	新线	438	674	570	588
	磨蚀到 7.5mm	321	488	413	424
170	新线	576	897	760	780
	磨蚀到 8.5mm	382	587	496	502

注　计算条件：大气温度 40℃，风速 0.5m/s，阳光量 0.1W/cm²，表面发射 η=0.9，频率 50Hz。

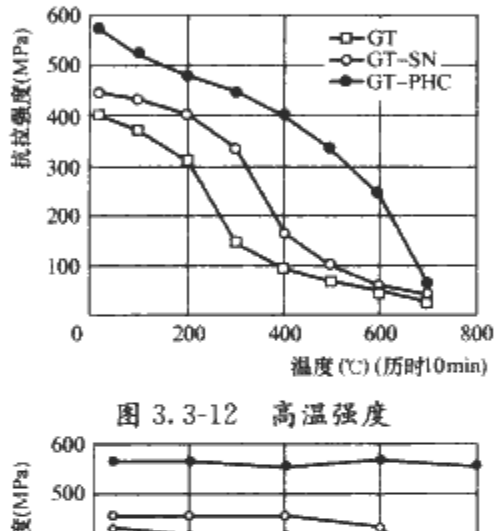


图 3.3-12　高温强度

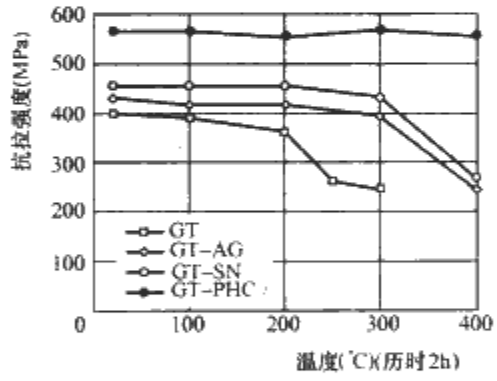


图 3.3-13　软化特性

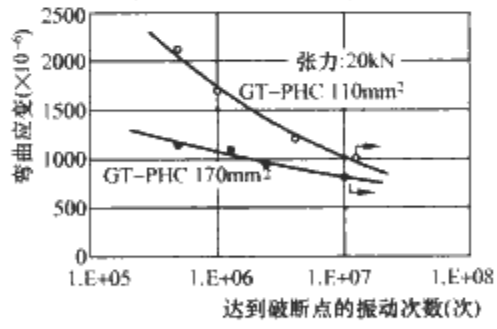


图 3.3-14　振动疲劳特性

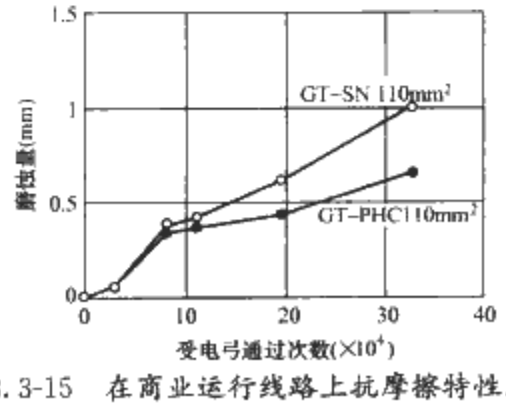


图 3.3-15　在商业运行线路上抗摩擦特性比较

表 3.3-35 GT、GT—AG、GT—SN、GT—PHC 综合比较

名 称	高速 (km/h)	耐热 (℃)	允许电流 (A)	磨损率	寿命周期	材料价格	总价格
GT170mm²	250	200	576	1.0	1.0	1.0	1.0
GT—AG170mm²	250	300	897	1.0	1.0	1.2	1.1
GT—SN170mm²	250	300	760	0.69	1.5	1.3	0.9
GT—PHC170mm²	290	400	780	0.38	2.6	2.6	0.6
GT—PHC110mm²	350	400	588	0.38	1.4	1.7	1.0

综上所述，各种铜合金接触线，从制造角度看，如 Cu—Ag、Cu—Sn、Cu—Mg 等都属固溶强化型合金，制造比较方便。目前这种接触线有三种制造方法，即：①连铸连轧低氧韧铜杆—拉制法；②无氧铜杆—轧制—拉制法；③无氧铜杆连续挤压—拉制法。它们是并存的，具有公平竞争的势态，要看导线的价格性能比。通过制造方法的改进，接触线的性能亦可获得适度的提高，以 120mm² 银铜接触线为例，用方法③获得的性能要优于方法②，见表 3.3-36。但总的来说，固溶强化型接触线的性能比固溶析出强化型接触线的性能要差。固溶析出强化型接触线在生产过程必然要涉及固溶处理问题，即使在连续制杆过程中实现充分的固溶（如果不完善，可能还要采取补充的固溶措施），但杆在进一步的加工过程中，还需经过时效析出处理。这些在生产中的热处理，必然涉及大型生产装备，也使生产过程复杂化，接触线成本明显上升，并且还涉及一次性投资与产出的经济效益问题。

表 3.3-36 无氧铜杆连续挤压—拉制法银铜接触线的性能

性 能	产品名称		标准要求③
	CTHA120①	CTHA120②	
20℃电导率 (%IACS)	102	96.6～98.3	≥96.5
伸长率 (%)	7.8	4.4	≥2.8
软化后伸长率 (%)	11		—
拉断力 (kN)	47.42	45.56	≥42.35
软化后拉断力 (kN)	44.90	40.08	≥38.12
扭转圈数 (圈)	7	5	≥5

① 为无氧铜杆连续挤压拉制的 CTHA120mm² 银铜接触线。
② 为无氧铜杆轧制拉制的与①同型号的银铜接触线。
③ 中国铁道行业 TB/T 281—1997 标准规定值。

3.5 稀土及其在铜合金中的应用

稀土在铜合金中的应用，大多采用纯稀土、稀土合金和混合稀土，为降低成本大多采用稀土合金或混合稀土，主要应用的稀土为钇、铈和镧等。稀土元素极为活泼，极易与大气中的氧化合，稀土加入熔体时通常采用保护气体保护或在充有惰性气体的真空感应炉中进行，采用碱性或石墨坩埚。稀土加入前铜合金熔体须预先除气，稀土经烘干。稀土的加入量也各不相同，通常考虑烧损量、净化作用量和合金化作用量，稀土加入量一般在 0.001%～0.3%范围。稀土在铜合金中的作用主要在于提高塑性，改善热加工性能（如降低铅、铋等的有害影响），改善铸造组织，防止偏析。稀土对电导率和强度的作用，一般认为稀土在铜中的溶解度极小，加入少量稀土对电导率不会有很大影响，但加入不能太多，稀土能与铜形成金属化合物，因而可提高强度。铈、钇能提高高导电铜的机械性能，但有一个极限值。钇的加入量比铈少，但效果似乎钇比铈更好。加入（0.1～0.6）%钇或铈或铪（非稀土元素），能使固溶体晶粒细化，提高室温强度和高温强度，能使再结晶温度约提高 100℃，随着钇、铈、铪加入量的增加，电导率下降，其中降低的效果依次为铪、铈、钇。稀土的加入可改善无氧高导电铜（OFHC）的抗氧化性能；在 Cu—Cr—Cd—Mg 系合金中，加入稀土可使热处理变得容易。稀土在铜合金中应用要注意“黏渣”，它影响流动性，影响铸造工艺性能和铸件的表面质量；有关分析问题，如分析精度很差，往往分析结果异常，给工作带来困难；有关熔炼炉问题，熔炼如在大气感应炉中进行，加入的稀土极易与大气中的氧形成大量的氧化物炉渣，这使工况变得复杂化。

向铜中加入 0.008%混合稀土即可显著改善铜的工艺性能；加入小于 0.1%钇时，铜的力学性能与工艺性能就有所改善；在铜中加入 0.1%～0.2%混合稀土后，可提高铜线的强度和延伸性能。

Cu—La 的二元相图如图 3.3-16 所示。镧是极易氧化、燃烧的元素，采用一般氯化物保护铜液中镧的烧损，其烧损率是相当大的，可达 42%～95%。但在低真空（真空度>1×10⁻¹mmHg）充氩保护的中频感应炉中快速（数分钟）熔炼，Cu—La 合金的成分是可以稳定的。图 3.3-17 示出了充氩熔炼镧含量与时间的关系。在铜中加入镧后可提高抗拉强度、硬度、高温强度和耐磨性，可用于制造直流电机用的整流子梯排，由于镧铜的耐热性和耐磨性与银铜相似，可替代银铜梯排而节约昂贵的银。镧铜中含镧 0.15%～0.30%，电导率可保持在 94%IACS 以上；镧铜的硬度、强度随冷变形程度的增加而提高，冷变形加工率在 20%～30%，有较好的综合性能；镧铜的室温硬度 HRB54～955，若经 350℃加热 2h 炉冷后，硬度仍能维持不低于室温硬度的 85%，即软化温度约为 350℃。图 3.3-18 示出了镧铜的含镧量对性能的影响。图 3.3-19 和表 3.3-37 示出了镧铜和银铜的软化特性比较。由银铜、锆铜、纯铜和镧铜做成的换向器在电机和电动工具中进行验证性对比试验，结果纯铜的磨损最大，其次是银铜、锆铜、镧铜具有最好的耐磨性。

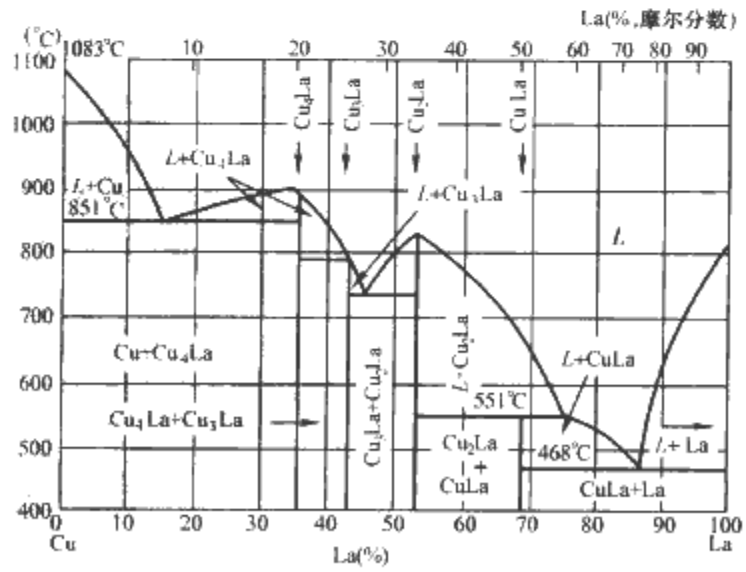


图 3.3-16 Cu—La 二元相图

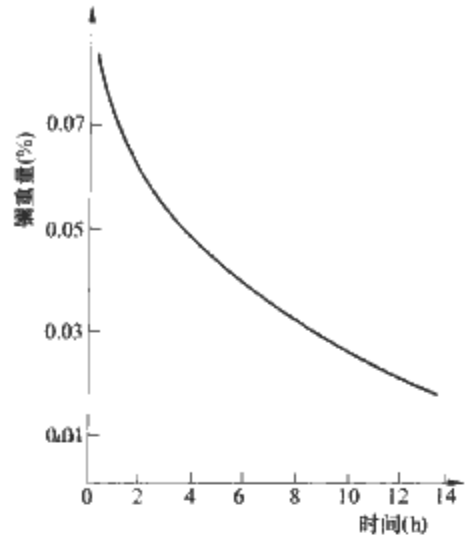


图 3.3-17　充氩熔炼镉含量与时间的关系

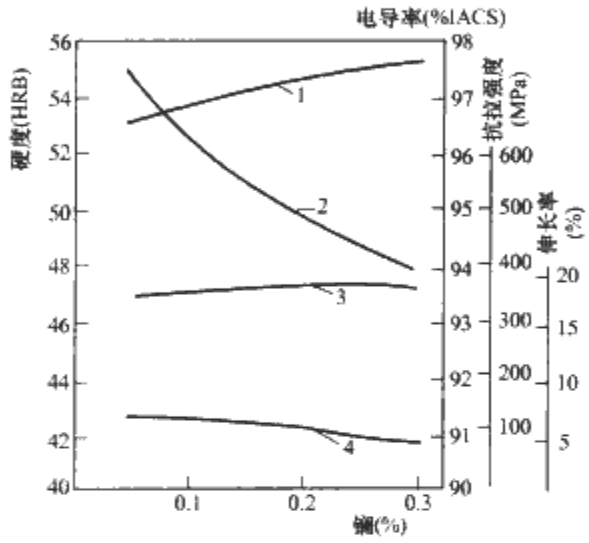


图 3.3-18　镉铜的含镉量对性能的影响
（镉铜加工工艺与银铜相同，无需高的加工率和热处理）
1—硬度（HRB）；2—电导率（%IACS）；
3—抗拉强度（MPa）；4—伸长率（%）

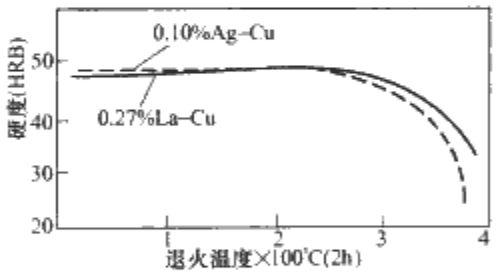


图 3.3-19　镉铜与银铜的软化特性

表 3.3-37　　镉铜与银铜的性能比较

合金	元素含量（%）	电导率（%IACS）	硬度（HRB）			抗拉强度（MPa）	伸长率（%）
			室温	300℃	350℃		
Cu—La	0.27La	94.7	48	46	42	383～392	2.5
Cu—Ag	0.10Ag	97.7	49	45	38	363～373	2.5

3.6　其他导电用铜合金及其应用

其他导电用铜合金的主要性能如表 3.3-38 所示。

表 3.3-38　　其他导电用铜合金的性能

合金组成	状态	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	电导率（%IACS）	超过韧铜的软化温度①（℃）
固溶强化合金（非热处理型）					
铜（脱氧）	A	220	55	100	—
	H	381～459	4	97.0	—

续表

合金组成	状态	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	电导率（%IACS）	超过韧铜的软化温度①（℃）
银铜（0.03～0.1Ag）	A	220	55	100	—
	H	381	4	97.0	
镉铜（0.7～1.0Cd）	A	281	45	—	—
	H	540～700	2	80	—
镉铜（0.13Cd，0.07P）	H	358.3	6	95	—
锡铜（0.09Sn，0.012O）	H	344.5	4	96	—
锡碲铜 0.07Sn,0.01Te,0.015O	H	351.4	4	99	—
锡硒铜（0.08Sn,0.01Se,0.016O）	H	379.0	4	99	—
碲铜（0.3～0.7Te）	A	231	50	96	—
	H	310	12	94	—
导电青铜（0.5～1.0Sn,0～0.5Cd）	A	281	50	—	—
	H	591～700	2	55～75	—
钴磷铜（0.182Co,0.020P）	H	284	27.1	85.6	350℃，加热 24h 后硬度 HB=101.2
镁锆铜（0.03Mg,0.03Zr）	H	350～430	12～7	94～92	275
镁磷银铜（0.1～0.12Mg,0.04～0.08P,最少 0.04Ag）	H	290～601	40～3	90～80	180
锆磷铜（0.04～0.10Zr，0.01～0.03P）	CW	350	8	92～98	150
析出强化合金（热处理型）					
铬铜（0.4～1.0Cr）	HT	400	22	--	—
	HTCW	420～510	30～20	80～85	—
铬锆镁铜（0.6Cr,0.1Zr,0.03Mg）	HTCW	491～579	5～7	76～85	—
铬锆镁铜（0.25Cr,0.10Zr,0.04Mg）	HTCW	601	12	72	300
锆铜（0.1～0.15Zr）	HT	310	35	—	—
	HTCW	381～490	15～10	85～90	—

注　A—退火的；H—硬的；HT—热处理的；HTCW—热处理和冷加工。
① 0.5h 或 1h 热处理。

锆铜与铬铜比较类似，它们都具有较好的高温性能，见图 3.3-20、图 3.3-21，但价格比其他铜合金贵，因此在梯排生产中没有获得广泛的应用，而只在特殊的场合使用。铬铜对缺口有敏感性，容易在缺口处裂开，但这个缺点可加入少量镁来克服。

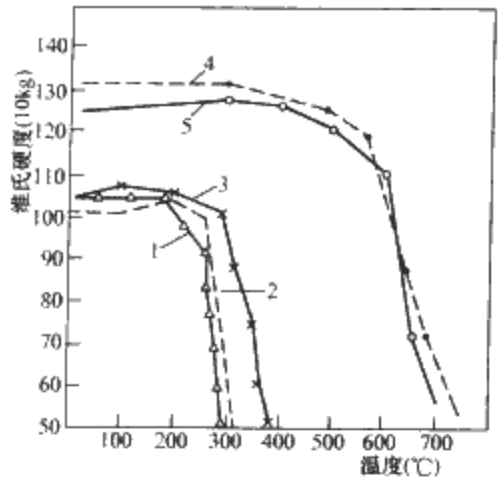


图 3.3-20 高导电铜和铜合金在 225℃下的维氏硬度
(冷加工率除铬铜、锆铜分别为
33%和 50%以外，其余均为 25%)
1—韧铜；2—无氧铜；
3—银铜；4—铬铜；5—锆铜

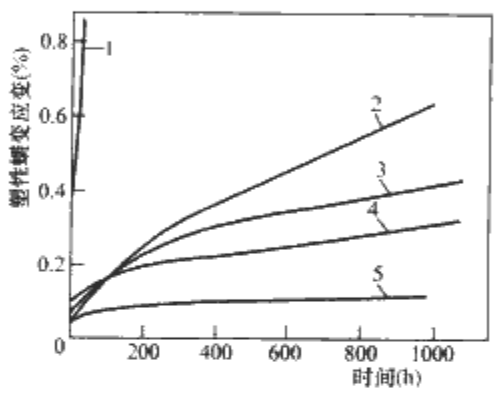


图 3.3-21 高导电铜和铜合金的抗软化性能
(试样在相应的温度下加热 30min、空冷和试验)
1—韧铜；2—无氧铜；3—银铜；
4—铬铜；5—锆铜

镁锆铜（Cu—0.03Mg—0.03Zr）由于在铜中加入了少量的镁和锆，不仅电导率比较高，而且它的软化温度比镉铜、银铜和韧铜高，制造工艺与韧铜差不多，在冷加工前不需固溶处理，可应用于镉铜和银铜的使用场合。

锡硒铜具有的耐退火性能相当或优于镉铜，电导率可高达 99%IACS，而且容易生产，可代替银铜和镉铜，也可在散热器上应用。

钴铜 Cu—0.028～0.5Co，显著的特点是耐高温。加热处理前后硬度几乎不变（见表 3.3-39）。它是非热处理型合金。适于用直流电机的整流子梯排和耐高温的绝缘电线。

表 3.3-39　　钴铜合金的性能

名称	成分(%)			冷加工后力学性能			350℃，24h 加热后硬度(HB)	电导率(%IACS)
	Cu	P	Co	抗拉强度(MPa)	伸率(%)	硬度(HB)		
铜	99.98	0.017	—	285	26.8	93.9	46.0	95.7
钴铜	99.97	0.020	0.182	285	27.1	102.5	101.2	85.6

铬—锆—铜系合金，如 Cu—0.6Cr—0.10Zr—0.03Mg 合金，兼有好的高温强度、电导率和伸率，在航空线和导弹线中应用可符合下列规定的性能：

抗拉强度（最小值）414MPa、电导率（最小值）85% IACS、伸长率（最小值）8%。由于它的热稳定性好，在作整流子梯排中应用比银铜的允许额定功率几乎大 1 倍；它亦可在电气开关和连续浇铸用的结晶轮上应用。随着铜、铝连铸连轧生产线的增加，结晶轮作为易耗品的用量也骤然增加，由此提出了改善结晶轮材料的要求。韧铜结晶轮高温保持性能差，银铜（含银 0.07%～0.12%）和铬铜（含铬 0.8%）经受循环热应力性能较差，此外铬铜还有“缺口（切口）”敏感性问题。Cu—0.6Cr—0.10Zr—0.03Mg（或 Cu—0.8Cr—0.12Zr 或 Cu—0.14Zr）的热处理型铜合金具有必需的热传导性能，又具有比银铜和铬铜更好的强度保持性能，并且它还具有较好的抗热应力的能力和较小的开裂敏感性。对这种铜合金结晶轮的制造，由离心浇铸获得的环形毛坯，要经轧轧、热处理和机加工获得要求的形状和尺寸，这种结晶轮的使用寿命将比原有的大为提高。

铬—锆—镁—稀土铜合金，如 Cu—（0.30—1.20）Cr—（0.03—0.08）Zr—（0.08—0.15）Mg—（0.05—0.10RE）合金，认为亦可用于连铸结晶轮、接触线、高炉风口、渣口和氧枪喷头等；Cu—0.30Cr—0.091Zr—0.015RE 铜合金，经冷变形、固溶处理后 470℃时效 2h，可获得最佳的综合性能，此时电导率为 84%IACS，硬度为 78.5HRB，有关稀土含量对时效后合金电导率和硬度的影响见图 3.3-22 和图 3.3-23。

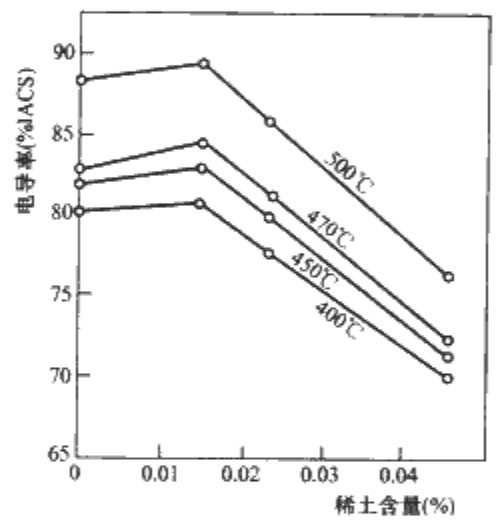


图 3.3-22 稀土含量对时效
后合金电导率的影响

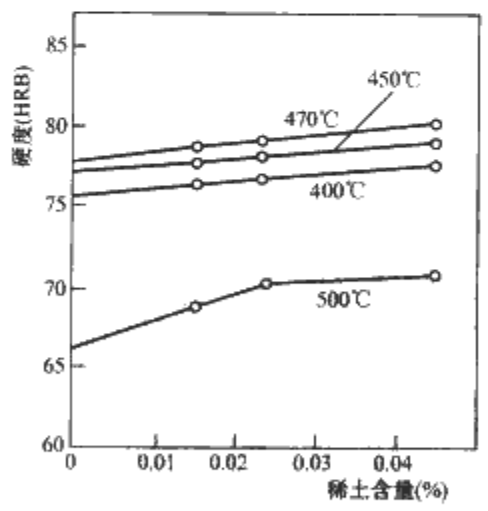


图 3.3-23 稀土含量对时效后
合金硬度的影响

锌—铬铜合金，如 Cu—（2—4）Zn—（0.4—0.9）Cr 合金固溶—冷变形后时效，像铬—锆—稀土铜合金那样，也有明显的变形热处理时效强化效果，合金在线水淬后经 45%预变形和 450℃时效 4h，合金的抗拉强度、屈伏强度和延伸率分别达到 482、388MPa 和 23.6%，电导率可达 78.2%IACS。

4　铜合金导体及其在特种电线电缆中的应用

4.1　含有微量锡的铜线在超微细铜线中的应用

随着电气器件向小型化和轻量化的发展，要求经冷拉和退火的超微细铜线越来越微细化，例如，扫瞄变压器、磁头等制作线圈用的漆包线，其直径已达 0.04mm，甚至 0.02mm 也已开发出来了。在超微细铜线的生产中有一个现象，也即在冷拉以后，在室温下保持时，超微细铜线的机械、电气性能会发生变化。这个现象类似于在室温下高纯铜的再结晶现象。这种现象的发生是由于“冷加工变形能”引起的，例如直径 0.04mm 的冷拉超微细铜线，其冷加工变形度（面积减缩率）已达到 99.8%，线越细，冷加工变形度越大，由此线中储存的变形能也越大，这种储存的变形能引起在室温下冷拉超微细铜线的再结晶，由此使在室温下再结晶的冷拉超微细线性能软化，降低了线的可拉性，并且在退火后招致产生不均匀的再结晶晶粒，进而恶化了退火的，漆包线的机械性能。图 3.3-24 示出了直径 0.04mm 超微细铜线在室温下抗拉强度和伸率的变化，图中 SCR1 为通常的超微细铜线；SCR55 为加有微量锡的超微细铜线，SCR1 和 SCR55 的材料成分如表 3.3-40 所示。由于 SCR55 超微细铜线在室温下无软化现象，机械性能随着时间几乎没有变化，电导率与通常的铜线一样，可用通常的方法那样制杆和设计制品，且能在通常的炉子中退火。它不仅可用于超微细铜漆包线，亦可在热浸镀锡的微细和超微细铜线中应用。

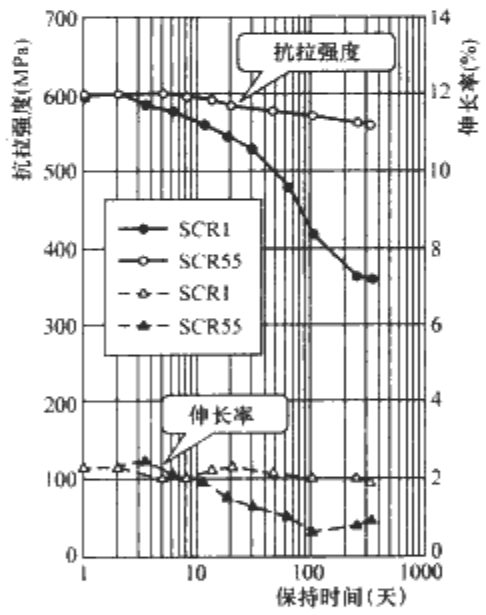


图 3.3-24　直径 0.04mm 超微细铜线在室温下抗拉强度和伸长率的变化
SCR55—加有微量锡的超微细铜线；
SCR1—通常的超微细铜线

表 3.3-40　　SCR1 和 SCR55 材料的成分（$\times10^{-6}$）

材料 \ 元素	Sn	Pb	Ag	Ni	Fe	As	Sb	Bi	Si	S	O
SCR1	1	5	4	1	<1	<1	<1	1	<1	8	318
SCR55	55	3	5	1	<1	<1	<1	1	<1	8	380

注　除 Sn 作为添加元素外，其余都可看作小量。

4.2　铜—锡—铟合金线在要求高弯曲疲劳寿命电线电缆中的应用

在电热毯、电地毯和超声波扫瞄器等场合使用的电线电缆，其导体不仅要有高强度、高导电、耐热性，而且要有高的弯曲疲劳寿命。电热毯用的铜合金制成薄带，约厚 0.05mm，而电地毯的铜合金制成圆线，其直径为 0.1～0.2mm。对这些带和线，不仅要求上述的高性能，而且希望降低价格，因此在选择合金类型时，都瞄准采用固溶强化型铜合金。添加元素含量在 400（质量）$\times10^{-6}$ 以上的 Cu—Sn、Cu—In、Cu—Mg 和 Cu—Cd 合金，它们的软化温度几乎是相同的（见图 3.3-25）。Cu—0.19Sn—0.2In 铜合金（代号 NN）不仅比 Cu—0.1Sn—0.1Mg 铜合金具有更好的工艺性能（后者在连铸连轧生产条件下易开裂），而且具有优秀的性能：抗拉强度 895MPa（通常的镉铜线约为 883MPa）；弯曲疲劳寿命 1.2×10^4 弯曲次数（至少 10 倍于韧铜线）；电导率 76%IACS；半软化温度 300℃（与镉铜基本相同）。

该种铜合金的工艺性能好，可用连铸连轧法生产，不需热处理，拉线时可拉性好，对模子的耐磨性优于 Cu—Zr 和 Cu—Cr 合金等析出强化型合金，与 Cu—Zn 合金相比，其磨损量小于 Cu—Zn 合金的 1/5。

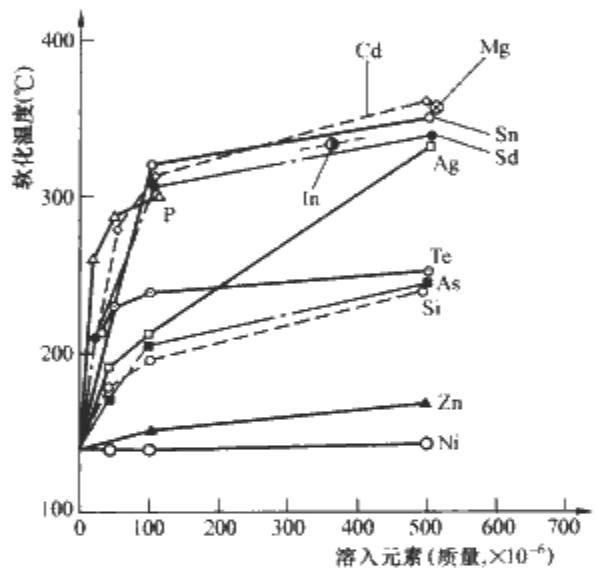


图 3.3-25　在铜合金中溶入元素的浓度与软化温度的关系

4.3　半软化(退火)铜—锡—铟合金线在负荷—应变范围广、且弯曲应变很高的柔软电缆中的应用

在液晶显示（LCDS）、数码视频相机、电路试验器、医疗超声波系统、工业机器人和计算机等应用的微型柔软电缆、多芯微型轴电缆和 LCD 线束组装体，在负荷—应变范围广而高的条件下经受着更大的弯曲和拧扭。此外，也正因电缆的微型化，单线的直径已达 0.016mm，而且还要做成绞线或束线，因此对铜合金线不仅要有好的、且有均衡的抗拉强度、伸长率和导电率的综合性能，而且要有好的可拉性，以保证获得极细的直径。表3.3-41 示出了可选择的合金成分和性能。由表 3.3-41 可以看出：半软化的 Cu—0.19Sn—0.2In（代号 NN）的铜—锡—铟合金线具有好的可靠性、柔软性和电导率，在整个负荷—应变范围内有长的弯曲疲劳寿命。该种线可用通常的制杆和制线法生产，因此有较好的价格/性能比，但为了调节好抗拉强度和伸长率的关系，半软化退火要采用专用的热处理方法，如用通常的热处理进行退火，则难于调节好抗拉强度和伸长率的关系。表 3.3-42 和图3.3-26 为镀银的半软化 NN 线在微型同轴电缆上应用的实例。

表 3.3-41 用于制造半软化铜合金线的成分和性能

代号	成分（%）	状态	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	电导率（%IACS）	N_f/N_o
ZR	Cu-0.16Zr	H	720	2	72.0	29
		1/2A	400	10	92.0	7
NN	Cu-0.19Sn-0.2In	H	890	3	76.3	29
		1/2A	395	11	82.2	7
		A	285	25	82.8	3
15SN	Cu-0.15Sn	H	810	3	84.1	17
		1/2A	355	16	90.0	4
		A	275	25	90.0	2
30SN	Cu-0.3Sn	H	875	3	73.1	29
		1/2A	405	11	78.2	7
		A	295	24	78.2	4
TPC	99.99Cu	H	595	2	95.9	3
		A	220	24	100.0	1

注 1. 线径 0.1mm；N_f—应变为 1.0%，铜合金线的反复弯曲次数；N_o—应变为 1.0%，A 状态 TPC 线的反复弯曲次数。

2. 状态：A—软态；H—硬态；1/2A—半软化（半退火）态；TPC—韧铜。

表 3.3-42 1/2ANN 绞线的结构和性能

线规 AWG	股数/线径	电阻（Ω/m）	拉断力（N）
30	7/0.1	0.378	21.6
32	7/0.08	0.591	13.8
34	7/0.064	0.928	8.60
36	7/0.05	1.52	5.12
38	7/0.04	2.39	3.27
40	7/0.03	4.25	1.79
42	7/0.025	6.16	1.24
44	7/0.02	9.68	0.775
46	7/0.016	15.2	0.496

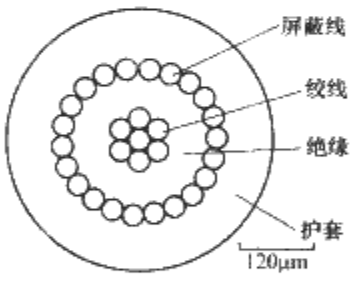


图 3.3-26 1/2ANN 线（44AWG/φ0.02mm）在微型同轴电缆上的应用（用于超声波医疗系统）

4.4 直径 0.016mm 铜—锡—铟（NN）线在超微型同轴电缆中的应用

随着医疗保健用电子设备的技术发展，超声波诊断技术用微型同轴电缆显得非常的需要，要求在不增电缆芯数的情况下，减小电缆的外径，并且要具有优良的图像信号传输性能。直径 0.016mm 的 Cu—0.19Sn—0.20In（代号 NN）的铜—锡—铟合金线不仅具有优秀的性能，而且可使电缆的外径减小一半，可满足 46AGW 线规的超微型同轴电缆的需要。表 3.3-43 示出了医疗用微型同轴电缆减小直径的发展趋向，表 3.3-44、表 3.3-45 和表 3.3-46 分别示出了 46AWG 超微型同轴电缆的技术规范、探测电缆的电气性能和弯曲与拧扭性能。图 3.3-27 示出了探测电缆和微型同轴电缆的结构［探测电缆由许多微型同轴电缆（MCXs）组成，用于传输超声波诊断设备的图像（高频信号）］。在开发此种超微型同轴电缆（UMCX）的同时，有关的组合技术也发展起来了，如电缆的终端及其为连接探头（压电元件）和电缆的微连接，以满足配套的需要。

对 0.016mm 超微细 NN 合金线的制造技术，在线材生产领域里具有很高的技术含量。这种技术是在超微细铜线生产的基础上，着重解决了引起拉丝断线的几个技术关键：①应用 SCR 连铸连轧低氧铜制杆技术，在加入合金元素时要限制合金元素的氧化；熔融的铜在流入浇包的铸造过程要安装过滤器，以滤去铸造过程可能混合熔体的外来夹杂物（耐火材料），由此改善原材料的质量。②在冷拉流过程中，要保持生产环境的清洁，以防止来自拉线过程的外来物质的进入。③要研究试验采用最佳的中间热处理和镀银的条件。

表 3.3-43 医疗用微型同轴电缆减小直径的趋向

AWG 线规	40AWG	42AWG	44AWG	46AWG
绞制（股数/线径 mm）	7/0.030	7/0.025	7/0.020	7/0.016
面积比	100	66	42	26
应 用	通常探测	3维超声	内窥超声图像	

注 196 芯 40AWG 微型同轴电缆和 46AWG 超微型同轴电缆的外径分别为 8.2mm 和 4.4mm。

表 3.3-44 超微型同轴电缆的技术规范

项目		规定值
芯数		196
内导体	AWG 线规	46
	绞制（股数/线径 mm）	7/0.016
	材料	镀银铜合金
	直径（mm）	0.048
绝缘	材料	PFA*
	厚度（mm）	0.033
	直径（mm）	0.115
外导体	型式	绕制
	材料	镀银铜合金
	厚度（mm）	0.02
护套	材料	PFA*
	厚度（mm）	0.025
	直径（mm）	0.205
组合直径（mm）		3.6
编织屏蔽	材料	镀锡退火铜
	股线	0.05
	覆盖（%）	85
外护套	材料	PVC
	厚度（mm）	0.25
	直径（mm）	4.4
电容［在 1kNz 下］（Ω/km）		标称 115
阻抗［在 10kNz 下］（Ω/km）		标称 50
衰减［在 10kNz 下］（dB/km）		标称 7.5
介质强度		耐 AC，500V，1min
导体电阻（20℃）（Ω/km）		最大 17 000
绝缘电阻（20℃）（Ω/km）		最小 100

注 1. PFA*—Perfluor oalkoxy。

2. 采用 7 股 0.016mm 超微细线绞成内导体，由此减小直径和改善弯曲性能。

表 3.3-45　使用 46AWG 超微型同轴探测电缆的电气性能

项　目	规 定 值	测量值
电容（在 1kNz 下）（Ω/km）	标称 115	115
阻抗（在 10kNz 下）（Ω/km）	标称 50	49.6
衰减（在 10kNz 下）（dB/km）	标称 7.5	7.1
介质强度	耐 AC、500V，1min	好
导体电阻（20℃）（Ω/km）	最大 17 000	15 159
绝缘电阻（20℃）（Ω/km）	最小 100	≥100

表 3.3-46　46AWG 超微型同轴探测电缆的弯曲与拧扭性能

项目	规定值（循环）	测量值（循环）
弯曲寿命	≥100 000	800 000（停止试验）
拧扭寿命	≥100 000	800 000（停止试验）
弯曲试验条件	拧扭试验条件	
弯 曲 角：90°	拧扭角：±180℃	
弯曲速度：30 循环/min	拧扭速度：30 循环/min	
负　　荷：4.9N	负 荷：11N	
弯曲半径：12.7mm	标距长：300mm	

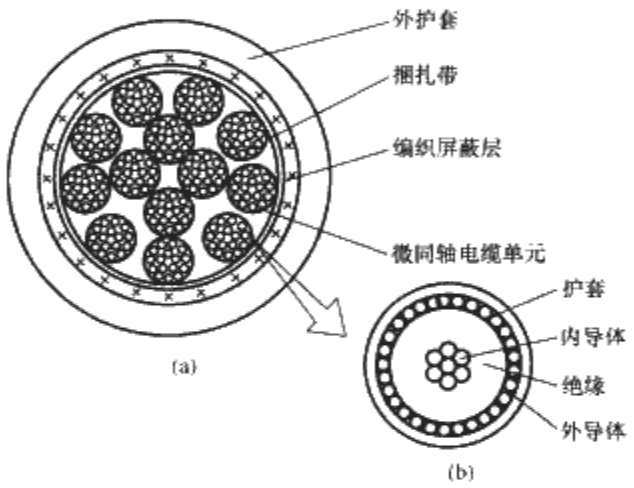


图 3.3-27　由许多微型同轴电缆组成的探测电缆
（a）探测电缆的结构；（b）微型同轴电缆的结构

4.5　铜—锡—铟和铜—锌合金在放电高速切割和精密加工用镀层电极线上的应用

放电加工（EDM）是基于放电现象的一种热机加工技术，随着先进的自动放电加工机的发展，放电加工已获得了广泛的应用。这种技术目前主要用于 IC 引线框架和腕手表用电子零件的模具以及汽车和家电工业的工件加工。放电加工用的电极线（线径 0.05～0.35mm）是一种易耗品，以前的电极线是镀有黄铜的铜线或黄铜线，但随着放电高速切割和精密切割加工的发展，对电极线提出了新的要求，要求能够实现精密加工、高速切割、允许用自动设备自动穿线（此时电极线必须非常直）和在大生产时要改善电极线的可拉性和稳定性，以达到好的价格/性能比。要达到上述要求，可采用镀层电极线的办法解决，此种电极线采用黄铜作为镀层，因为黄铜具有稳定放电的能力，随着黄铜中锌的增加，放电能力增加，但此种电极线可拉性下降，因此要研究镀层中锌的浓度分布问题，希望达到锌的浓度高，而且也有好的可拉性。对此种电极线的芯材，要求有好的耐热性，也即在高温下有好的机械强度，不致在高速切割的高温下发生断线；另外，要有好的抗发热性和有效的散热性，也即要有高的电导率，因为电导率高，导热性也高，两者是一致的。日本日立电缆公司（Hitachi Cable）开发的 4 种镀层电极线如表 3.3-47 所示。图 3.3-28 示出了镀层电极线和加工件的样品，可允许对各种材料（从普通钢到硬—切割钢）的精密加工。

表 3.3-47　镀层电极线

牌号 / 项目	HIF	HIE	HIR	HIS	HBZ
抗拉强度（MPa）	820	760	780	750	1080
伸长率（%）	1.2	1.2	1.4	1.4	2.1
电导率（%IACS）	50.0	50.0	30	50	22
电极线的结构	镀层：单相黄铜（Cu—35% Zn）；芯线：铜—锡—铟合金	镀层：二相黄铜（Cu—40% Zn）；芯线：铜—锡—铟合金	镀层：高锌黄铜；芯线：小于 35% Zn 的黄铜	镀层：铜—锡—铟合金；芯线：铜—锡—铟合金	黄铜线（Cu—40% Zn 二相黄铜）
用途	高速切割，精密加工	超高速切割	高速切割，精密加工	超高速切割	一般切割
加工效率	比 Cu—35% Zn 黄铜电极快 15%；精密度同 Cu—40% Zn 黄铜电极线	比 Cu—35% Zn 黄铜电极线快 20%	切割速度低于 HIS 线	在标准切割速度下比黄铜线约快 20%；在高速切割条件下，约快 80%	

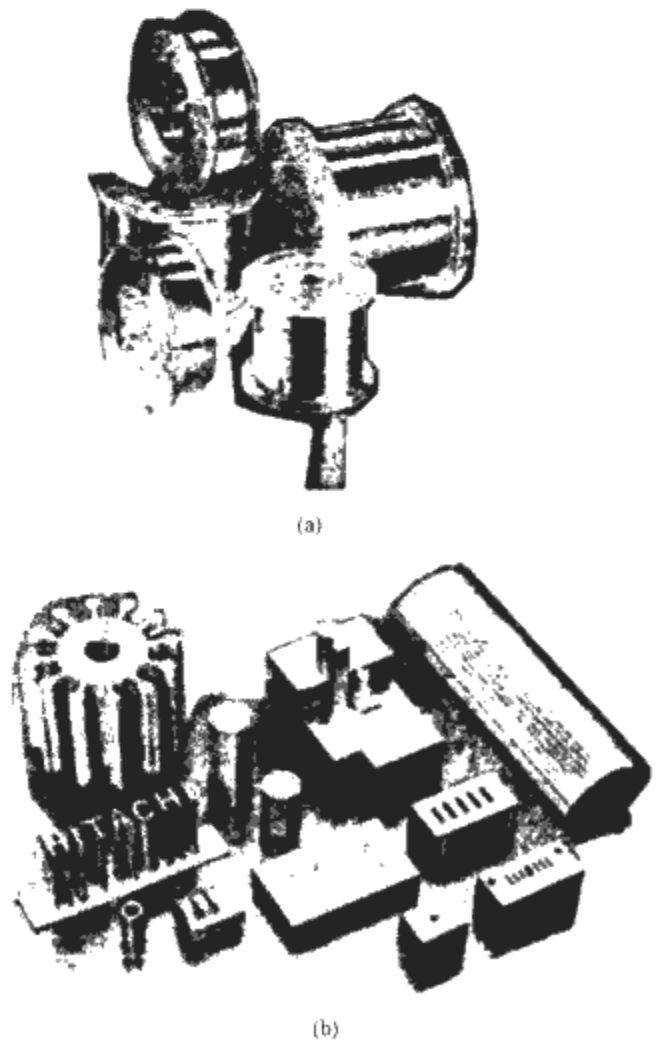


图 3.3-28　镀层电极线和加工工件样品
（a）镀层电极线；（b）工件样品

5 镉铜导体及其代用

镉铜在线缆工业中的应用到底有否前景，已争论多年，在这期间新的无镉铜合金材料，也相继开发出来了。但在航空航天工业中总感到应用镉铜导线好，对由无镉铜合金代用材料制成的线的可靠性和长期稳定性总是存有疑虑，认为缺乏长期跟踪的可靠性记录。之所以要代替金属镉，是因为镉有毒，对人体肝脏有损伤，并与癌症有关。镉对人类健康的危害与镉的存在形式和浓度有关，镉金属和镉合金不是自身构成毒性，镉的毒性体现于长期暴露处于高浓度的烟气、镉尘或溶解的镉化物（镉离子）中，在正常的浓度下不会构成不可接受的有害性。环境中镉的上升主要来自化肥的使用和燃烧矿物燃料。

世界各国对镉的限制是不同的，但每年都通过更苛刻的限制。因为环境问题，全世界已减少了许多镉铜合金生产商，而且还没有迹象表明需要增加产能。到目前为止，美国事实上没有限制使用镉，只是尽量减少使用，并优先控制其环境排放。例如美国汽车制造商已经有效禁止其所有产品使用镉材料。欧盟官方公报于 2005 年 8 月 13 日正式实施《报废电子电气设备指令》（WEEE 指令），限制许多设备使用诸如镉、铅、汞等有危害的物质，要求镉小于或等于 100×10^{-6}，铅、六价铬、汞小于或等于 1000×10^{-6}，指令也要求在今后欧盟市场上流通的电器生产商（包括其进口商和经销商）必须承担支付报废产品回收费用。2006 年 7 月 1 日将正式实施《关于在电子电气设备中禁止使用某些有害物质指令》（ROHS 指令）。指令规定，欧盟市场上将禁止含有特定有害物质的产品出售及使用。总之电线电缆工业用的镉铜导体及其代用已是大势所趋。

铜合金对电线电缆工业来说不是新的材料，例如在 ASTM105 和 ASTM B624 标准中早已作了比较明确的规定，并在以后新开发的无镉导体中，在性能上与上列两个标准和特定的军标相衡量。原先电缆工业主要使用两种铜合金系为镉铜 C16200 或 CDA162 合金和镉铬铜 PD135 合金，它们主要的应用市场在军工、航空、航天、汽车和医疗设备等，它们往往都要拉成很细的线，并镀上锡或银或镍，甚至镀上前者材料的复合镀层，然后制成绞线或束线，再加上高温绝缘和编织屏蔽层制成特种电线电缆使用。

对无镉铜合金的开发和应用，在国际上如 Fisk Alloy Wire 公司、Phelps Dodge High Performance Conductor 公司、Temco 公司和 FSP－one 公司等虽已开发了一些品种，但真正作出响应，系统研究开发制造铜合金杆比较方便，在深加工中能拉成要求直径的细线，并具有高强度、高导电、耐热等性能，经电镀或热镀、绞制或束制，并在挤压和高温烧结绝缘材料、成缆后导体还能保持优秀性能的无镉铜合金导体还是在前几年才进行的。

“Percon11”、“Percon17”和“Micro-shield”（Fisk 公司）是无镉铜合金，但不制成铜合金杆，也不能将其容易地拉成为绞制导体用的细线。而“Percon19”和“Percon24”也是无镉铜合金，专为在导线上应用开发的。“Percon11”与 CDA150 铜合金类似，属锆铜合金；“Percon17”拟代替 CDA162 镉铜合金，属弥散强化合金，在铜基体中含有铁和磷酸镁；“Percon19”用以代替 CDA162，属铜—镁—磷—锡合金，设计该种合金以抗拉强度和弯曲性能的提高为基准，在应用中弯曲寿命超过 CDA162 的性能，其抗拉强度通常为 827MPa，电导率为 73%IACS；“Percon24”的设计规范要超过 ASTM B624，属铜—铬—锆固溶析出强化合金。这种合金其熔体的含氧量要求低于 10×10^{-6}，在铸造方法上要保证合金的组织高度均匀，以保证能拉出超细线。“Percon24”需要热处理设备，其典型的抗拉强度高于 ASTM B624，最小值为 414MPa，最小电导率为 90%IACS，超过了特定的要求，导体具有优秀的弯曲寿命和抗软化性能。

“Miro－shield”无镉铜合金是铜－镍－锡的固溶强化合金，适于拉制微细线作编织屏蔽应用。这种合金通过铸造和加工工艺的改进，可拉出强度非常高和极细的线。抗拉强度可超过 1034MPa，电导率为 10%IACS，在通信、电子方面成了理想的选择物，在高强度同轴屏蔽电缆上应用或用以代替在其他应用中的不锈钢屏蔽，此种线材不同于不锈钢线可镀镍或银或锡。

“HPC”铜合金（Phelps Dodge 公司），不含镉，是一种多用途的高性能合金，可制成 0.025mm 以上的微细线，可镀锡或银或镍，符合 ASTM B105、ASTM B624 和 MIL－W－82598 导体标准的要求，也可制成型线。线的抗拉强度和电导率在硬态和软态下分别可达到 758.3MPa、80%IACS 和 399.3MPa、85%IACS。

“Cuprofor®”（无镉）钴铜合金（Fsp－one 公司），含有 0.28%钴和 0.08 磷，最小线径可拉到 0.03mm，可以镀锡、银和镍，抗拉强度在硬态和软态下分别达到 638MPa 和 392MPa，电导率为 75%IACS。

“CI203”（无镉）铜合金，含有 99.8%铜、少量铁和痕迹元素。该合金由英国 Temco 和芬兰 Outokumpu 公司合作开发，是一种高强度和高导电铜合金，用以代替镉铜。裸的和有镀层（锡或银或镍）的线可达 0.05mm，其抗拉强度为 800MPa 左右，而电导率保持在 80%IACS。在硬态和软态下的电导率一般为 85%IACS 和 90%IACS。CI203 合金冷加工时，面积减缩率可容易地达到 99.99%，在重的冷加工以后，为了进一步加工，材料仍然具有延展性。表 3.3-48 列出了 CI203 合金的机械和电气性能。由表可以看出，在室温下 CI203 合金尤其是微细线具有良好的机械和电气的综合性能，并在重的冷加工状态下仍保持它的电导率。图 3.3-29 为 CI203 合金温度与抗拉强度的关系；图 3.3-30 为 CI203 合金和无氧铜（Cu－OF）退火 1h 的软化性能；图 3.3-31 为直径 0.8mm CI203 合金线退火 1min 和 5min 的软化性能；图 3.3-32 为 CI203 合金和无氧铜的疲劳曲线。CI203 合金具有像铜那样良好的抗应力腐蚀裂开的性能和非常好的抗氢脆性能。CI203 合金亦具有与无氧铜类似的制造性能，并适用于像纯铜那样的方法进行连接。

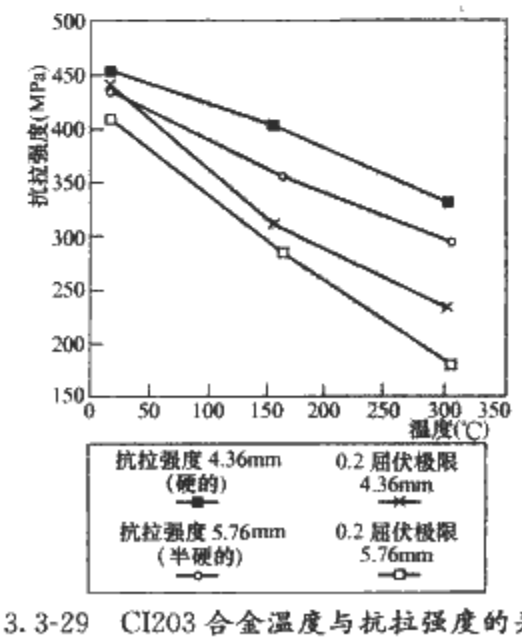


图 3.3-29 CI203 合金温度与抗拉强度的关系

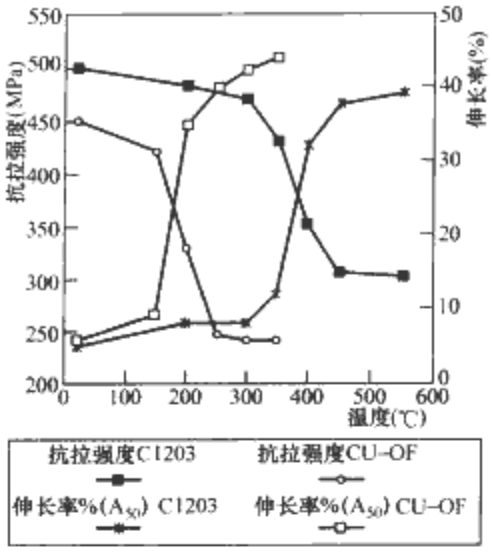


图 3.3-30　CI203 合金和无氧铜退火 1h 的软化性能

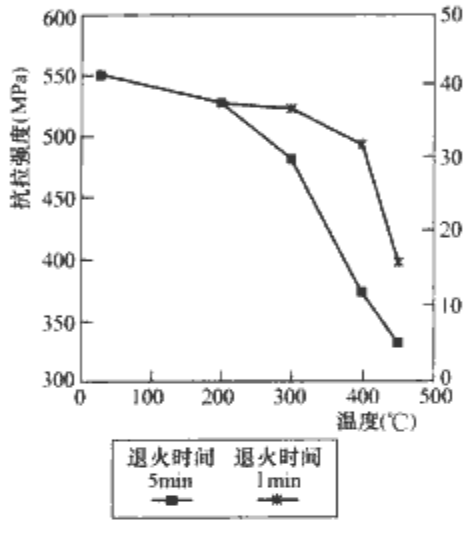


图 3.3-31　直径 0.8mm CI203 合金线退火 1min 和 5min 的软化性能

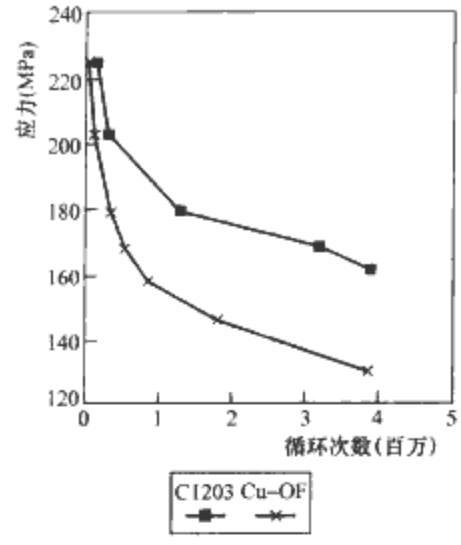


图 3.3-32　CI203 合金和无氧铜的疲劳曲线

表 3.3-48　　CI203 合金的机械电气性能

状态	抗拉强度 (MPa)	0.2% 屈伏极限 (MPa)	伸长率 (A_{50}%)	硬度 (HV)	电导率 (%IACS)
退火的	270	120	44	72	90
半硬的	420	410	17	118	88
硬的	500	490	5	130	87
弹性硬	550	510	3	132	86
超弹性硬	700～750	—	—	—	85

第 4 章 铝 导 体

铜、铝导体是电工行业的基础材料，2006 年中国电缆工业电工铝导体的总用量已达 100 余万吨，位居世界前列。原材料铝和制造铝导体材料的成分对电工铝导体的生产和质量起着决定性的作用。中国的铝矿资源含硅量高，在深脱硅技术没有解决的情况下，不利于电工铝导体的生产，故在 20 世纪 80 年代以前，一直制约着我国电工铝导体的发展。我国自主创新的稀土优化综合处理技术生产电工铝导体，独树一帜地突破了这个难题，解决了我国电工铝导体生产的数量和质量问题。这种处理技术特别对含硅 0.09%～0.13% 的非电工级铝进行处理，具有最佳的技术经济效益；它不仅适用于中国，也适用于和中国矿藏资源（铝矿含硅高）相似或缺乏电工级铝锭制造电工铝导体的国家。同样也适用于废铝直接利用生产电工铝导体。在举世瞩目的三峡工程中，±500kV直流超高压输电导线应用的就是我国自己的电工铝导体生产技术，今后在西电东送、全国联网、在世界最高电压等级的交流 1000kV 和直流±800kV 超高压线路上都将使用由中国技术和材料制造的导线。

中国是一个缺铜的国家，20 世纪 60～70 年代，由于铜铝差价大，以铝节铜，曾获得了较大的进展。当时，铝芯电力电缆的用量几乎占了整个电力电缆用量的一半，而架空输电线路用的钢芯铝绞线的用铝量直至目前仍一直在上升。随着铜进口的增加，铜、铝差价的变小，以铝节铜又走向了低潮。目前，铜价暴涨，铜、铝差价又变得很大，因此，预计以铝节铜和以废铝直接利用制造电工铝导体将出现新的转机。在此必须指出的是："以铝节铜"不等于什么都要"以铝代铜"，而应实事求是，该用铜的地方，还应该用铜，以免造成电工装备整机技术经济效果的下降。

1 铝导体的原材料

制造电工铝导体的铝材，有其特定的要求，这是由铝导体的用途和性能要求所决定的。一般说，电工导体用的铝要求比较高，所以国际上都有电工用铝锭的牌号和铝连铸连轧电工圆铝杆用铝锭的行业规范或企业内控标准。

制造电工导体用的铝材，纯度太高，电导率很高，但往往强度达不到要求。如在铝连铸连轧时采用强冷措施，杆的强度达到了要求，但往往伸长率又太低。这种强冷杆经拉线，强度提高不多，最终线的强度还是达不到要求，此外高纯铝也贵，因此一般不太用于电工铝导体。铝材纯度太低，电导率低下，强度尚可，也不适于制造电工铝导体。要判别铝材的优劣不仅要考察化学成分和价格，也应考虑它的工艺性能，有的铝纯度（品位）尚可，但熔铸时铝液"发黏"，容易产生铸条开裂，轧制断杆，影响质量、产量。若采用提温熔铸，不仅能耗和铝耗增加，亦增加了吸氢危害的机率。因此，对这种铝材，电工铝导体生产者亦是不欢迎的。

1.1 电工铝导体用铝锭及其正确的选用

如果按 GB/T 1196—2002《重熔用铝锭》中的化学成分选择铝锭（见表 3.4-1），那么牌号为 Al99.85（即 99.85% 铝）的铝锭（如钛、钒、锰、铬的总和不大于 0.01%）不经稀土优化综合处理，由铝连铸连轧制杆，然后拉制成电工铝导线是可以符合电工铝导体的系列基础标准要求的；牌号为 Al99.70A 和 Al99.70 的铝锭，它们的区别主要在含硅量，两者的含硅量分别为 0.10%和 0.12%，这两种牌号的铝锭，不管钛、钒、锰、铬的总和大于或小于 0.01%，在铝连铸连轧制杆的条件下，如不经稀土优化综合处理，那么，电工用硬拉圆铝线（GB/T 17048—1997《架空绞线用硬铝线》、IEC 60889—1987《用于架空导线的冷拔铝丝》）将达不到电导率≥61% IACS 和具有标准或采购规范规定的强度要求或者导体制品的成品率甚低，这是经大量研究和生产实践所证明了的。电缆工业在铝连铸连轧条件下，所生产的电工铝导体，绝大多数使用的就是 Al99.70A 和 Al99.70 两种牌号的重熔用铝锭作为原材料的。这是因为用稀土优化综合处理技术生产的电工铝导体，对含硅 0.09%～0.13%的非电工级铝锭（或称普铝锭）进行处理具有最佳的技术经济效果。

表 3.4-1 GB/T 1196—2002 重熔用铝锭化学成分

牌号	化学成分（质量分数）（%）								
	Al 不小于	杂质，不大于							
		Fe	Si	Cu	Ga	Mg	Zn①	其他每种	总和
Al99.90	99.90	0.07	0.05	0.005	0.020	0.01	0.025	0.010	0.10
Al99.85	99.85	0.12	0.08	0.005	0.030	0.02	0.030	0.015	0.15
Al99.70A	99.70	0.20	0.10	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.30
Al99.70	99.70	0.20	0.12	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.30
Al99.60	99.60	0.25	0.16	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.40
Al99.50	99.50	0.30	0.22	0.02	0.03	0.05	0.05	0.03	0.50
Al99.00	99.00	0.50	0.42	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05	1.00

注 1. 铝质量分数为 100%与质量分数等于或大于 0.010%的所有杂质总和的差值。

2. 表中未规定的其他杂质元素，如 Mn、Ti、V，供方可不做常规分析，但应定期分析，每年至少两次。

3. 用于食品、卫生工业用的重熔用铝锭，其杂质 Pb、As、Cd 的质量分数均不大于 0.01%。

4. 对于表中未规定的其他杂质元素含量，如需方有特殊要求时，可由供需双方另行协议。

5. 分析数值的判定采用修约比较法，数值修约规则按 GB/T 8170《数值修约规则》的有关规定进行。修约数位与表中所列极限值数位一致。

① 若铝锭中杂质 Zn 质量分数不小于 0.010%时，供方应将其作为常规分析元素，并纳入杂质总和；若铝锭中杂质 Zn 质量分数小于 0.010%时，供方可不作常规分析，但应每季度分析一次，监控其含量。

在电工铝导体生产中，架空导线用的硬铝线是要求最高的，它必须兼有 61% IACS 及以上的电导率和高的抗拉强度（特别线径在 4.0mm 以上的粗线），所以是最难做的电工铝制品，否则难于大生产和推广应用。因为电导率和抗拉强度始终是互相矛盾的。即使高硼铝或许在铝连铸连轧的大生产条件下可做出稍高的电导率，但制品的抗拉强度较低，并对原材料的要求又很高，且在大生产中的成品率又低。所以它难以成为大生产的角色。

在电缆生产中，有的铝芯电缆，如塑料绝缘的实芯铝电缆、磁悬浮轨道交通用的长定子铝芯电缆，对铝导体不仅要求高电导率，还要求高的柔软性，此时，要选用Al99.85及以上的重熔用铝锭，那么为什么又不用高硼铝呢？因为在这些电缆中使用的铝导体（作电缆芯）是需经退火处理的，以取得优良的柔软性。但经退火后高硼铝的柔软性是不如Al99.70铝锭做的铝导体的柔软性好，所以也限制了使用。高硼铝导体退火后柔软性差的原因可能与含硼量太高有关。

在电子用铝线—裸线或漆包铝线和超导体的稳定保护材料中需用纯度更高的精铝，精铝锭的成分及其制品性能见第3篇第1章。

1.2 铝锭的牌号（铝的总含量%）、应控杂质元素的个数和数量

有不少电工铝导体的生产和使用者会有疑问，在国际电工委员会IEC 6889—1987《用于架空导线的冷拔铝丝》（我国GB/T 17048—1997《架空绞线用硬铝线》等同采用此标准）中规定“硬铝线应由铝的含量不小于99.5%的铝制成”，可我国用牌号为Al99.50的铝锭却做不出电导率≥61% IACS的硬铝导线，甚至用Al99.70A和Al99.70铝锭，还要经稀土优化处理后才能达到≥61% IACS的要求。其原因在于我国重熔用铝锭标准中的牌号，应受控元素的个数和数量与国外铝连铸连轧用电工用铝锭（见表3.4-2）的化学成分，应受控元素的个数和数量是不同的，因此在国外标准中规定的铝含量（99.5%）与我国重熔用铝锭标准的牌号是不相对应的。因为铝锭中的铝含量不是直接测定的，而是通过100%减去杂质总量计算出来的，国内外对铝锭纯度（含铝量）的规定，区别在于分析杂质元素的个数是不同的，国外规定了铜、铁、硅、锰、镁、锌、镍、铬、钒、钛、锆、硼、镓、锡、钠、铅共16种杂质元素。我国GB/T 1196—2002《重熔用铝锭》标准规定铁、硅、铜、镓、镁和锌7种杂质元素（见表3.4-2）。IEC标准中规定铝含量应不小于99.5%的铝，实际上其最低纯度已相当于和高于我国99.7%铝锭的水平，而且硅含量的最高值比我国标准中99.7%铝的硅含量规定的最高值0.10%～0.12%要低得多。这点对制造电工铝导体的铝材而言特别重要，也是99.7%重熔用铝锭（即普铝锭或非电工级铝锭）用于制造电工铝导体要否进行稀土优化综合处理和技术经济效果优劣的关键所在。

表3.4-2 国外铝连铸连轧用电工用铝锭的化学成分

元素	范围	特高纯	高 纯	中高纯	中 纯	中低纯
Cu	最高	0.004	0.004	0.008	0.008	0.01
	典型	0.002	0.002	0.004	0.005	0.006
Fe	最高	0.07～0.11	0.08～0.12	0.10～0.18	0.11～0.18	0.12～0.19
	典型	0.09	0.10	0.12	0.13	0.16
Si	最高	0.03～0.045	0.05	0.05～0.058	0.055～0.07	0.058～0.074
	典型	0.035	0.04	0.05	0.062	0.067
Mn	最高	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005
	典型	<0.001	<0.001	0.002	0.003	0.003
Mg	最高	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005
	典型	<0.001	0.001	0.001 5	0.02	0.003
Zn	最高	0.015	0.02	0.02	0.025	0.03
	典型	0.008	0.01	0.01	0.015	0.02
Ni	最高	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005
	典型	<0.001	<0.001	0.001	0.0015	0.002

续表

元素	范围	特高纯	高 纯	中高纯	中 纯	中低纯
Cr	最高	0.001	0.001	0.003	0.003	0.005
	典型	<0.001	<0.001	0.001	0.002	0.002
V	最高	0.001	0.001	0.003	0.003	0.003
	典型	<0.001	<0.001	<0.001 5	0.002	0.002
Zr	最高	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
	典型	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.001
Ti	最高	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005
	典型	<0.001	<0.001	0.001	0.001	0.002
B	最高	0.012	0.014	0.018	0.018	0.021
	典型	0.007	0.009	0.010	0.012	0.016
Ga,Sn	最高	0.010	0.012	0.016	0.022	0.027
	典型	0.005	0.006	0.007	0.012	0.016
Na	最高	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004
	典型	<0.001	<0.001	0.001	0.002	0.003
Pb	最高	0.002	0.002	0.003	0.005	0.005
	典型	<0.001	<0.01	0.001	0.002 5	0.003
最低纯度		99.81	99.79	99.71	99.69	99.66

1.3 我国电缆工业对电工用铝锭化学成分的要求

从我国的矿藏资源和实情出发，我国的冶金工业可向电缆工业供应大量的含硅量高于电工用（电工级）铝锭（见表3.4-3）的Al99.7普铝锭。由上海电缆研究所自主创新的稀土优化综合处理技术是我国电工铝导体生产中的一项主导技术，可以不用电工级铝锭，采用Al99.7普铝锭（在英国伦敦市场注册，和国际接轨的名称为标准铝），在铝连铸连轧生产中进行稀土优化综合处理就能达到电工铝导体的性能要求，而且可执行国际先进标准实现工业化的稳定生产。对不同的原料铝应用稀土优化综合处理技术具有明确的针对性，总之，不管是国内的或是国外的标准铝均可采用该技术而获得显著的技术经济效果。当然，我国电缆工业亦欢迎采用物美价廉的铝锭，化学成分符合表3.4-3规定的电工级铝锭，这样或许可省去稀土优化处理（稀土优化处理不仅仅是针对铝中硅对电导率的有害影响，有时为了针对不同的铝锭，为改善铝中Ti、V、Mn、Cr对电导率的有害影响，改善铸、轧工艺性能和提高强度，也需进行稀土优化处理和硼化处理，以取得良好的技术经济效果）。

表3.4-3 我国电缆工业对电工用铝锭（电工级铝锭）化学成分的要求

牌号	化学成分							
	Al不小于	杂质不大于						
		Fe	Si	Cu	Ga	Mg	Ti+V+Mn+Cr	总和
Al99.7E	99.7	0.18	0.08	0.005	0.030	0.030	0.01	0.30

注 E意为电工用或电工级铝锭。

近年来，在三峡工程用720mm² 钢芯铝绞线中所需的特粗（直径4.53mm）、高强度硬铝线利用稀土优化综合处理技术，其电工铝杆和线的性能如表3.4-4所示，取得了显著的效果。

表 3.4-4 特粗高强硬铝线及杆的性能

名 称	抗拉强度 (MPa)	电导率 (%IACS)
电工铝杆	130～135	61.90
电工硬铝线	180～190	61.58

注 原材料铝为标准铝。

1.4 电缆工业关于 GB/T 3954—2001《电工圆铝杆》的说明

电工圆铝杆是电缆行业的基础半成品材料，它质量的优劣与电线电缆产品的基本性能直接密切相关，而且电工圆铝杆亦是全国电线电缆厂的生产大户和使用大户，现在也有部分铝厂也生产电工圆铝杆，供部分没有生产电工圆铝杆条件的电线电缆厂使用，并且由铝行业起草和提出了 GB/T 3954—2001《电工圆铝杆》，见表 3.4-5。为了使电工圆铝杆的生产者、电线电缆厂的使用者和电线电缆产品的应用者获得正确的了解和选用，在下面将提出几点说明。电工圆铝杆的重要性是由于铝杆的加工工艺和电线电缆性能对铝杆的特殊要求所决定的。例如为了保证重要架空输电线路上用的架空导线的质量，在进行投标时，允许参与投标的电线电缆厂的必要条件之一就是“该厂必须具备连铸连轧的制杆条件”。由此看来，如果在标准问题上不慎重处理，将导致市场混乱、导体性能下降、电线电缆产品质量下降、成本上升、国标与先进的国际标准接轨困难、影响出口、浪费国家稀土资源和打乱整个电线电缆产品的标准体系。

表 3.4-5 电工圆铝杆中的材料化学成分

品 种	材 料	化学成分 (%)							
		RE	Si	Fe	Cu	V+Ti+Mn+Cr	其他元素		Al
							每种	总和	
		不 大 于							不小于
纯铝电工圆铝杆	纯铝	—	0.11	0.25	0.01	0.02	0.02	0.1	99.6
稀土铝电工圆铝杆	稀土铝	0.1～0.30	0.16	0.30	0.02	0.02	0.02	0.1	余量

注 一般情况下，当产品力学性能、电性能等合格时，化学成分不作检验指标，如需方对化学成分有特殊要求时，应在合同中注明。

(1) 没有必要和需要规定两个电工圆铝杆品种，即纯铝电工圆铝杆和稀土铝电工圆铝杆。电工行业需要的铝杆就是电工圆铝杆一种，国内如此，国外亦如此。铝杆性能只要满足了电工铝导体性能的要求，就属电工圆铝杆的范畴，可以做下一步深加工使用。必须指出：在电工圆铝杆中之所以应用稀土，并不是要去搞稀土铝合金杆或稀土铝合金线（用稀土的铝合金杆或铝合金线，电缆行业另有品种和标准，但不属电工圆铝杆标准的范畴之内），它只是电缆行业开发创新的一种工艺处理方法，在稀土优化综合处理的方法中除应用稀土处理外，也包括硼化处理和控铁处理。电线电缆厂根据材料的来源，可以不采用工艺处理，可以采用一种或两种，甚至同时用三种方法进行处理，以满足电工铝导体最终性能的要求，但根据应用三种处理的排列组合绝不会规定 6 个品种的电工圆铝杆。

(2) 如表 3.4-5 中所提出的有关材料的化学成分，杂质含量如此之高的材料，采用铝连铸连轧制杆，然后拉线，特别是在量大面广的架空导线上应用的硬铝线，要在保证强度下，确保电导率不低于 61% IACS 和稳定生产是不现实的。如果按表 3.4-5 所示的标称规定值进行验证，要稳定达到电工硬铝线的要求是可望而不可即的。其实，有关这方面的数据、知识和生产实践早已有过结论了。此外，由于铝材杂质如此之高，铝导线的耐腐蚀性能（特别是作架空导线使用）必然会明显地下降。本想加入稀土能在某种条件下增加导线的耐腐性能，但不能抵消杂质含量增加的负面作用。有可能稀土加了，导线的成本提高了，但导线的耐腐蚀性能反而可能下降了。

(3) 用非电工级铝锭，即普通铝锭，采取稀土优化综合处理的工艺方法所生产的电工铝导体［简称稀土铝线或稀土铝导（绞）线］只是扩大了为制造电工铝导体的材料来源，达到了电工铝导体（无稀土）的性能要求，它不是新的导体品种，只是属于电工铝导体的范畴，更不是填补了电工铝导体的空白或者有了稀土铝导体就可以取代电工铝导体了。事实上在生产中，稀土铝导体的性能只要达到了电工铝导体的技术要求，产品就可等同于电工铝导体销售和应用，但在产品出口中，还必须注意买方应用标准中对硅（不大于 0.1% 及以下）的要求，要与国际相接轨，以免造成不必要的经济损失。

(4) 稀土铝线和电工铝线相比，其电导率的标准值没有提高，只是把非电工级铝锭，通过稀土优化综合处理技术使它达到了电工铝导体对电导率的要求，即电导率≥61% IACS，电阻率≤0.028 264Ω · mm^2/m。在 GB/T 17048—1997《架空绞线用硬铝线》和 GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》中电导率仍规定为≥61.0% IACS，这个要求与国际现行标准是一致的、接轨的。

(5) 稀土铝线和电工铝线相比，其抗拉强度的标准值没有提高。因为要使 99.70%铝材达到电工铝导体的电导率需加入的稀土是比较少的，在这样的稀土含量下，稀土铝线的抗拉强度并不比电工铝线（无稀土的）高，只是达到了电工铝线的强度要求，也即达到了 GB/T 17048—1997《架空绞线用硬线标准》和 GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》的要求。如果有人要说，即使有细微的提高，也算是提高，那么我们要说，工业产品不同于实验室的试验，在生产条件下，允许的工艺参数波动范围，实际上已掩盖了抗拉强度的细微变化。因此，在稀土铝线上不体现抗拉强度的提高，从而在标准上就不能反映出抗拉强度的提高，也只是达到了或说相当于电工铝线的抗拉强度。

(6) 稀土铝线和电工铝线相比，它们的耐腐蚀性能各有千秋，不能用谁优谁劣来概括。为了阐明这个问题，必须针对环境条件（或说快速腐蚀试验条件，或说线路架设区段的气象条件）和对导线的防腐要求来比较和作出选择。铝的纯度越高，耐腐蚀性越好；铝中杂质越多，耐腐蚀性能和电导率就越低。随着线路架设区段气象、环境条件的不同，线路设计对导线提出了是否要特殊防腐的要求。由于架空导（绞）线是由股线绞制而成的多层结构，同种股线材料接触、导线抗腐蚀性能较好，但对钢芯铝绞线而言，钢芯和铝股线是不同材料相接触，电化腐蚀作用相对严重，使导线的抗腐蚀能力下降。从线路运行实践证明，在钢芯铝绞线中首先腐蚀和破坏的是镀锌钢丝，而不是铝股线，为此提出了采用防腐油的防腐钢芯铝绞线，在钢芯和铝股线间涂油称为轻防腐导线，如再在铝绞层间涂油称为中防腐导线，例如在沿海地区等盐雾比较重的线路区段要用此种防腐导线，但也有采用铝包钢线或采用锌 5%铝稀土合金镀层的耐腐蚀钢丝，以提高钢芯铝绞线的抗腐能力。据电工铝线和稀土铝线在不同模

拟条件下的人工加速腐蚀对比试验表明：在盐雾试验和盐酸浸渍试验条件下，也即模拟在氯离子浓度比较高的海边或工业区的环境条件下，稀土铝线的耐腐性能比（不含稀土的）电工铝线好；在氢氧化钠浸渍试验（模拟工业区的碱性气氛条件）和二氧化硫气体腐蚀试验（模拟工业区的气氛）条件下，稀土铝线与电工铝线的耐腐性能要看在基体铝材料中所含的铁、硅、铜杂质含得少、耐腐性能就好；在恒定湿热试验（模拟潮湿而闷热）的条件下，稀土铝线和电工铝线的耐腐蚀结果差不多，无明显差别。

为了提高导线的防腐能力，由上可以看出，对稀土铝线和电工铝线耐腐性能的谁优谁劣是不能笼统地一概而论的，要看架线地区的气象、环境、防腐要求、防腐材料和导线组成股线的选择。有人说，为了推广应用稀土铝导（绞）线，在220kV及以上架空线路用的导线，特别是500kV线路的导线一定要用稀土铝导线是不妥当的，也是缺乏科学依据的。现行的架空导线国家标准是与国际标准相接轨的，全世界都在用电工铝导线，稀土铝线属电工铝线的范畴，两者应根据电缆厂的材料来源和用户需要并列应用才对。

（7）稀土铝线和电工铝线都有好的表面光洁度，因此不会引起电晕损耗的差异。光说导线的光洁度，其概念是模糊的，实质性的内容应指表面的光亮和光滑的程度，光亮一般来说与电晕无关，而光滑与电晕损耗有关。光亮的线，其表面不一定光滑，不光亮的线，往往表面反而光滑。表面出现轻的起丝，甚至起槽，这往往与拉线时不良的润滑有关，这是不可取的。在稀土铝线中如稀土含量太高，拉出的线即使似乎感觉有点光亮，但也正因为稀土含量太高，往往在拉线时因产生粘模问题而致使表面出现起丝，甚至起槽的不光滑现象，所以太光亮或说“极光”是不一定好的。在拉线时由于润滑剂的原因，在表面残留着一层薄薄的油膜，似乎感觉不太亮，但表面是光滑的，有利于使电晕损耗减小，所以追求的实质是要表面光滑而不是光亮，这点必须阐明，以纠正有些人对“光洁度”不正确的片面理解。一般来说，不管是电工铝线或稀土铝线，它们表面的光滑程度都主要受到制杆过程的缺陷、搬运损伤、拉线模具及其润滑、绞线过程的擦伤和刮伤的影响。线缆制造厂没有发现，也不存在稀土铝线光滑度好、电工铝线光滑度差的实践，也就是说，表面光滑度一般而言与稀土无关，但如稀土加入太多，因拉线粘铝而降低表面光滑度，甚至造成废线。

（8）在原材料铝锭的工艺操作性能较差时，在该种铝锭中加入适量的混合稀土，在铝连铸连轧时可改善铸、轧过程的工艺性能。由于稀土的加入可不太强调铝锭中Fe/Si比一定要大于1.3的要求，可改善在铸、轧中出现的开裂问题，从而在万不得以中缓解了由铝锭引起的在铸、轧工艺操作中出现的质量问题。

（9）稀土在铝导线中只是起着调质的作用，即工业“味精”的作用，主体基础材料还是铝。铝的成分对铝导体的性能，特别是电导率起着决定性的作用。过去，曾对稀土在铝导体中的应用有点喧宾夺主的宣传，似乎只要加了一点稀土以后就可以成为高耐蚀、高导电和高强度的了，因此要另制定一个稀土铝导（绞）线标准。但电缆行业一直认为稀土铝导（绞）线不是一个新品种，所以也不需要、不同意另制定一个新的稀土铝导（绞）线标准。稀土铝导（绞）线的性能只要达到了GB/T 17048—1997《架空绞线用硬铝线》、GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》的标准就可按电工铝导体生产和出售。其实稀土铝导线不是一种合金线，稀土在铝中多加了，正像如上所述会产生其他不利的副作用，而且又浪费了稀土资源。在铝中加入稀土只是在电工铝导体生产中需要时采取的一种工艺方法。同样，在现行生产中，在需要时也要采取加入低量或微量硼的工艺处理措施。如果以此类推，加了稀土就叫稀土铝导线，那么加了硼也可叫硼铝导线，同时加了稀土、硼和铁，又可叫稀土硼铁铝导线。实际上只要把这种工艺处理做得适当，这些导线都可达到电工铝导线的要求，都可用于制造架空导线，或作型材（线）或作导电线芯用于制造各种电线电缆。

2 杂质元素对铝导体性能的影响

2.1 铝的性能

（1）物理性能（见表3.4-6）。

表3.4-6 电工用铝的物理性能

名 称	数 值
相对原子质量	26.98
结晶	面心立方
晶格常数（10^{-10}m）	4.049 6
密度（0℃）（g/cm³）	2.698
熔点（℃）	660
线膨胀系数（20℃）（10^{-6}℃$^{-1}$）	23.5
热传导率（20℃）[W/（m·K）]	238
体积电阻率（20℃）（$10^{-5}\Omega$·cm）	2.69
电阻温度系数（20℃）（1/℃）	0.004 2
电导率（20℃）（%IACS）	软：62 硬：61
抗拉强度（MPa）	软：55～95 硬：120以上
弹性模数（kN/mm²）	75.5
质量磁化率（10^{-6}）	+0.65
比热容（20℃）[J/（kg·K）]	899.6

（2）力学性能。不同纯度铝的典型力学性能见表3.4-7，铝纯度与强度、硬度的关系见图3.4-1和图3.4-2。

表3.4-7 纯铝退火状态的典型力学性能

纯 度（%）	σ_b（MPa）	$\sigma_{0.2}$（MPa）	σ_5（MPa）	HRS	τ（MPa）	σ_{-1}（MPa）	E（GPa）
99.99	45	10	50	13	—	—	62
99.8	60	20	45	15	—	—	—
99.7	65	26	—	—	—	—	—
99.6	70	30	43	19	50	20	—
99.5	85	30	30	—	55	—	69

注 τ为剪切强度；σ_{-1}为疲劳强度。

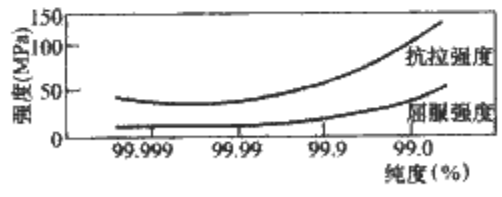


图3.4-1 铝的纯度与强度的关系

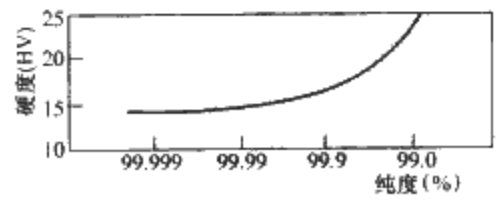


图3.4-2 铝的纯度与硬度的关系

(3) 化学性能。铝是电负性金属，其电极电位为(−0.5～−3)V，99.99%纯铝在 5.3%NaCl+0.3%H_2O_2 溶液中对甘汞参比电极的电位为（−0.87～+0.01）V。铝是最活泼的工业金属之一，由于表面上极易形成致密的连续的牢固的氧化膜（Al_2O_3），在许多氧化性介质、水、大气、部分中性溶液，许多的弱酸与强氧化性介质中，有相当高的稳定性。通常，氧化膜在 pH＝4.0～9.0 的溶液中是稳定的，在浓硝酸（pH＝1）和浓氢氧化铵溶液（pH＝13）中也是稳定的。因此，凡是能改善氧化膜致密性、增加氧化膜厚度和提高氧化膜绝缘性能的因素，都有助于抗蚀性的提高。反之，凡是降低氧化膜有效保护作用的因素，不论是机械的还是化学的，都会使铝的抗蚀性下降。

(4) 电学性能。金属的电导率（电阻率）根据导电的量子理论，在导体中发生电阻是由于当破坏了晶格正常结构的条件下，在电磁波和原子相互作用时电磁能量散射的结果。在绝对零度下，在理想的完美的晶体中原子呈周期地排列，电磁波穿过晶格不会受到阻碍，从而那时不会呈现电阻。在实际的情况下，金属导体的晶格已被畸变了，并且不在绝对零度下使用。引起晶格畸变主要的原因是原子热振动和运动，掺进了其他金属的异类原子，在合金中组织的变化以及存在各种不完整性（断层、位错等……）。当温度增加时，金属原子在晶格附近发生振动，从而引起电子波的散射，致使电阻增加；异类原子的存在（杂质或添加元素）引起金属晶格的破坏，从而导致电阻增加；像铝、铜、银等的电阻率甚至在相当大的变形下（达到 70%）总共也只增加百分之几（大约 2%～6%）。金属电阻率的增加是因为在冷变形条件下空间晶格增加了畸变。在塑性变形下，所得到的畸变像与原子热振动有关的畸变那样起作用。显然，由于变形影响和改变了原子间的联系。这个变化导致原子间的距离增加。当降低温度达到绝对零度时，没有变形过的金属的电阻率将会减小。在绝对零度下，变形过的金属具有最终的电阻，叫做残余电阻。当形成空间晶格的离子没有热振动时，它表征着在金属的总电阻中由变形引起的那部分电阻。

在 20℃下纯度 99.990%和纯度≥99.995%的铝，它们的电导率分别可达 64.94% IACS 和（65.06～65.80）% IACS。在低温时，铝的导电性能（见第 3 篇第 1 章）对纯度十分敏感。铝的晶粒大小对电导率几乎没有影响，但工业纯铝的电导率随冷加率的增加而下降。铝的电阻温度系数随其纯度的提高而增大。在温度极低时，工业纯铝与高纯铝的电阻率相差甚大，例如在 4.2K 下，99.965%铝的电阻率是在 273K 时的 200 倍，而 99.999 8%铝的电阻率则是在 273K 时的 4500 倍，因此，可根据铝在极低温度下的电阻率确定其纯度。铝的纯度与电导率的关系如图 3.4-3 所示。纯铝无光电效应。退火材料的导电性能无各向异性，冷加工材料纵向的电导率比其他方向的电导率高 0.5%～1.0%。

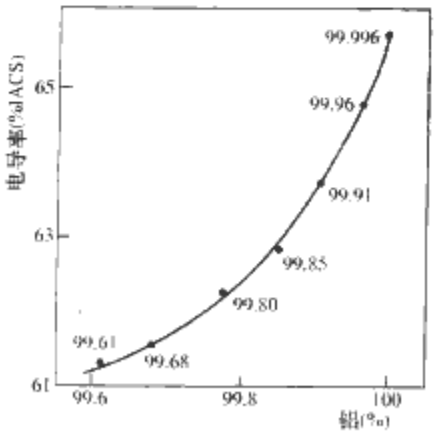


图 3.4-3 铝的纯度与电导率的关系

(5) 磁学性能。纯铝属弱磁材料。磁化率与铝的纯度和温度有关（见图 3.4-4），与晶面的原子密度有关，与晶粒大小有关。在一定条件下，晶粒大小对磁化率的影响甚至超过杂质元素的影响。铝的单晶体磁化率还与晶向有关（见表 3.4-8）。

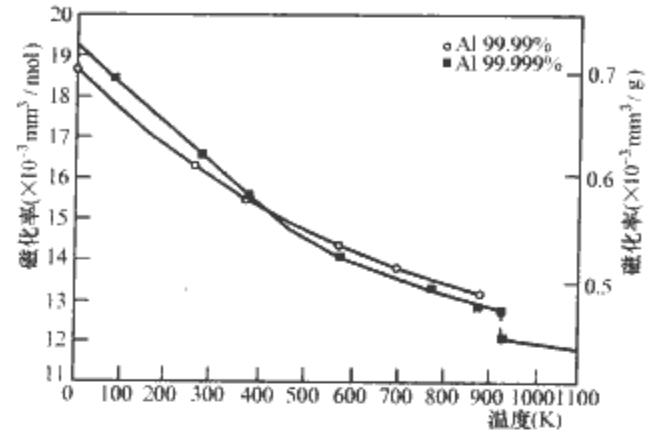


图 3.4-4 铝的磁化率与铝的纯度和温度的关系

表 3.4-8 高纯铝（99.999%）单晶体不同晶向的磁化率

垂直于磁场的晶面	(111)	(100)	(110)	(210)	(121)	(310)	(311)
磁化率($\times10^{-6}cm^3/g$)	0.541	0.561	0.614	0.625	0.612	0.745	0.730

2.2 杂质元素的影响

电工铝导体的化学成分对导体性能起着决定的作用。所谓化学成分，指的是元素及其含量。

一般而言，杂质能提高纯铝的力学性能。除镁和锰以外，多数杂质降低铝的耐蚀性能。在铝用作导电材料时必须严格控制和处理降低电导率的杂质，而保留、甚至添加某种能提高力学性能的元素。各种元素对纯铝导电性能的影响见图 3.4-5。在铝导体中最关注的有害杂质元素为硅、铁、钛、钒、锰、铬，如图 3.4-5 所示，其他影响电导率的元素，如铜、镓、镁、锆、锂、锌等，在我国的铝矿资源条件下，在铝锭中的含量很低，不构成对铝导体电导率的严重影响。我国的重熔用铝锭，如用国产的氧化铝为原料，则钛、钒、锰、铬的总和一般是比较低的，约在 0.01%左右及以下。如果用国外进口的氧化铝为原料，则与国外的铝锭一样，一般钛、钒、锰、铬总和的含量比较高（其中尤以 Ti、V 含量为更高），约在 0.01%以上。有关上列主要有害杂质的危害性和应有的注意事项简要分述如下：

硅——从图 3.4-5 看，硅对电导率的危害烈度比 Ti、V、Mn、Cr、Li 和 Mg 低，但在中国矿源的条件下，铝锭中的含硅量普遍比国外的高，因此对电导率危害最大，硅高不利于电工铝导线的生产。这就是我国自解放以来，在 30 多年的时间里电工铝导体的性能，特别是电导率，一直达不到国外水平的主要原因。硅高对铝连铸连轧的工艺性能也不好，易引起铸条开裂，铸条轧裂、甚至轧断，在拉线中出现断线，这也是在老的概念中要求铝锭中的 Fe/Si 一定要不小于 1.3 的原因，但现在随着对电工铝导体中硅的严格控制和稀土优化综合化处理工艺的应用，对 Fe/Si 的要求已不是那样严格地要求了。

铁——铁在铝中存在，会降低铝导体的电导率。但由于铁在常温下在铝中的固溶度很小，因此它对铝电导率的影响相对其他有害元素是比较小的。正因如此，在少降低电导率的条件下，铁又是在铝导体中首选的增强元素之一。在铝连铸连轧制杆条件下，通过强冷措施可以提高杆的抗拉强度，但一经过通拉线，增强效果就降低，甚至消失了，这是因为只是“外在的增强”，而加铁可起到实在的“内在的增强”作用，效果明显，

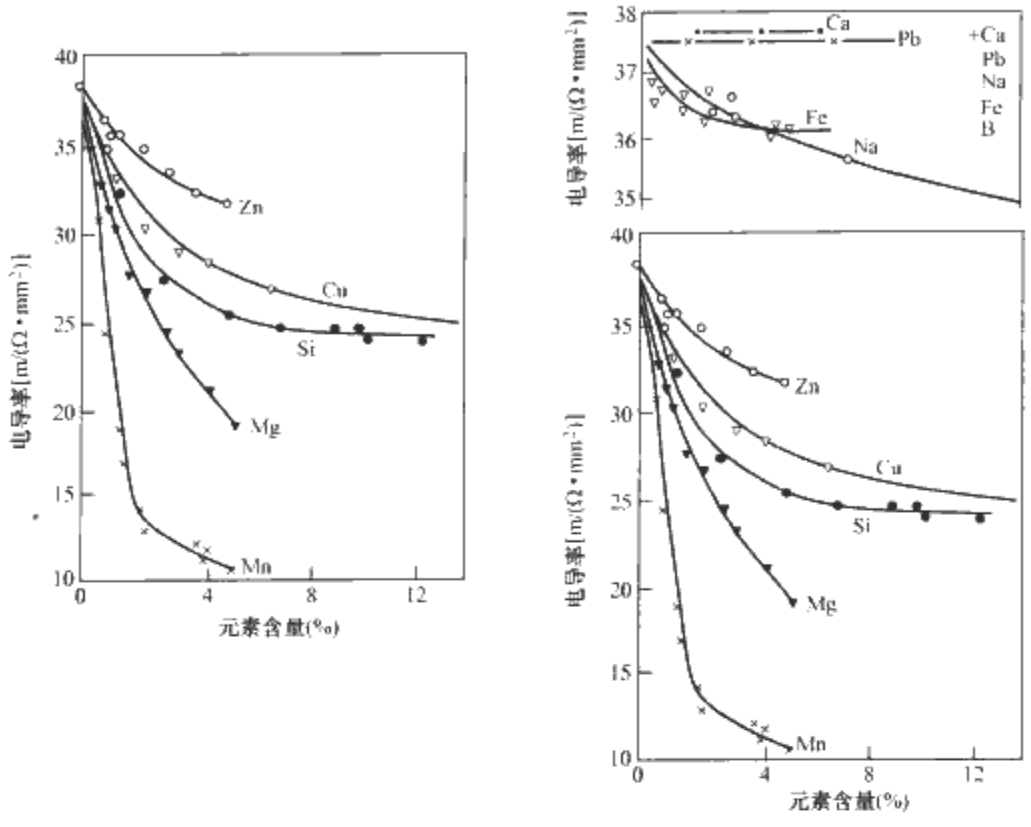


图 3.4-5 合金元素和杂质对纯铝（99.99%）导电性能的影响

[电阻率单位 Ω·mm²/m；电导率单位%IACS；电导率为电阻率的倒数，单位为 m/(Ω·mm²)]

且随着冷拉加工率的增加更显出它增强的效果。

铁也不能加得太多，一是降低电导率，二是如果铁加得不均，甚至可能会出现脆断的现象，这是必须注意避免的。

硅和铁——在硅和铁同时存在的情况下，硅和铁对纯铝力学性能的影响如图 3.4-6 所示。据试验表明铁和硅对电工铝导体的耐腐蚀性能是不利的，因此利用补铁增强已达到符合要求的条件下，铁亦应严加控制，尽可能取低值为好。

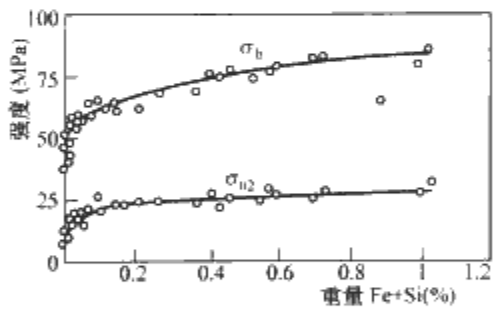


图 3.4-6 铁和硅对纯铝（退火状态）抗拉强度的影响

钛、钒、锰和铬——这四种元素，在电工铝导体中的含量分别只有千分之几，但它们对电导率的影响，比硅和铁分别处于十分之几时降低的电导率还要大。因此在电工铝导体中必须严加控制，并要像硅和铁那样进行常规分析，如果钛、钒、锰、铬之和大于 0.01%，一般就要进行硼化处理。按 GB/T 1196—2002《重熔用铝锭》的规定，钛、钒、锰、铬是不作常规分析的，但对电工铝导体生产而言，进厂铝锭无论是进口的、还是国产的都应对上述四元素进常规分析。现在，国产铝锭的原材料（氧化铝）有国产的、进口的及国产和进口混合后使用的，所以国产铝锭的上述四元素含量不明，不能按以往的进口铝锭要分析，国内铝锭可分析或不分析的一刀切的办法来处理。在铝锭中的四种元素尤以钛或钒的含量为最多。

铜、镁和镓——这三种元素对电导率都有害，但它们的含量和危害烈度比较小。在铝锭标准范围内铜的含量在 0.01%～0.005%，镁的含量在 0.03%，镓的含量为 0.03%，还未发现对电工铝导体的电导率有明显的影响。至于镓对电导率影响的烈度在锌与钴之间。如果为了制造导电用耐热铝合金，铜、镁和铁作为锆的辅助性添加剂，对提高铝的再结晶温度是有益的（见图 3.4-7）。

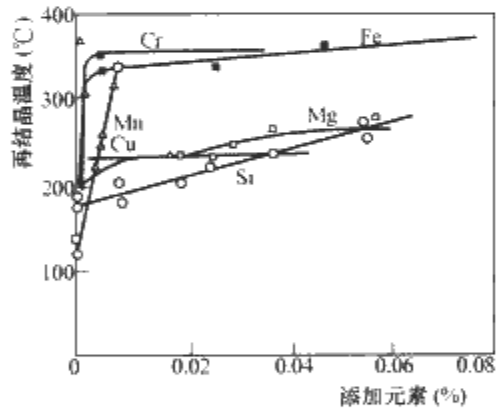


图 3.4-7 微量元素对高纯铝（99.999%）再结晶温度的影响（冷变形度 40%）

3 电工铝杆生产

电工铝杆是半制品，但它是电工铝导体制品的质量中心。电工铝杆的生产是整个电工铝导体生产质量保证体系的中心。电工铝杆的性能主要决定于成分及其工艺处理，但其质量和对后续拉线生产的影响主要取决于连铸连轧，由此引起的问题要占到整个生产的 80%～90%。

3.1 电工铝杆生产的工艺流程和主要装备

电工铝导（绞）线的基础是材料，不在导（绞）线的结构，生产的关键技术在制杆。电工铝杆生产的工艺流程如图 3.4-8 所示。目前，中国已是铝的第一生产大国，但中国的铝矿资源含硅较高，在深脱硅技术没有解决的情况下，会严重影响电工铝导体的性能和生产，其主要问题是电导率低下，达不到国际公认的 61%IACS 的水平以及与其相矛盾的强度问题。中国电工铝导体的研究、开发和生产经历了两个

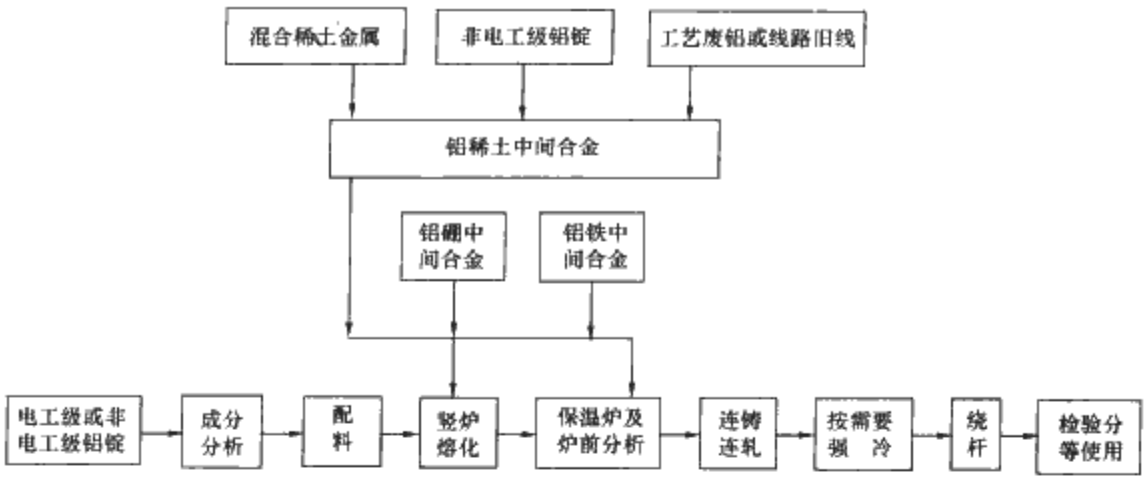


图 3.4-8 电工铝杆生产工艺流程

阶段。第一阶段，在 20 世纪 80 年代初以前，研究国产铝导体性能低下的原因和设法提高它的性能。由此，试制了国产的电工用铝锭及其铝导体，使电工铝导体的系列基础标准全面提升，达到了国际同类通用标准的水平。在电工铝导体的装备上，开发出了适合中国国情的铝连铸连轧生产线，甩掉了采用铝线锭和回线式轧机的生产方式。第二阶段，从 80 年代初至今，是中国电工铝导体发展道路上数量与质量、继承与创新的飞跃阶段，在技术上由“必然王国”走向了“自由王国”。为我国电工铝导体和经稀土优化综合处理的电工铝导体提高电导率，解决了量大面广的国产的材料来源和达到工业化的稳定生产，实现了具有中国自主知识产权的技术创新，使我国的电工铝导体生产达到了国际先进的水平。在电工铝导体的生产装备上，适合中国国情的生产装备已基本配套，但与国外装备相比，连铸连轧生产线的自动化水平尚有一定差距。国外最先进的铝（铝合金）连铸连轧生产线从炉子到铸机、轧机和成品杆所有的操作，用集成控制可完全、连续地被监测和控制，几乎可消除人工操作的错误，从而可保证不同要求的铝（铝合金）杆的性能获得良好的重复。生产线除可生产圆杆外，只需简单地改变最后 2 个或 3 个机架，亦可生产范围宽的“扇形”的型材，并使之成圈，用于“以铝节铜”的实芯铝电缆的扇形线芯。

先进的连铸连轧生产线主要由下列部分组成：①炉子，可用气体、液化天然气等为能源，亦可用感应电炉。② 浇铸机，结晶轮直径基于产量的需要，已达 1675～2438mm。浇铸机有五轮式（美国南方线材公司）和两轮式（意大利普洛浦捷公司）两种。③ 铝液过滤装置。④ 铝液除气（主要氢气）装置。⑤ 铸条剪切装置，对大的装备用圆盘剪；小的装备用手动液压剪。⑥ 连轧机，主要有“摩根式”和“普洛浦捷式”两种，属轧件无扭转连轧机。⑦ 裂纹探伤设备。⑧ 铝杆成圈机，有松圈成圈和双盘连续紧圈成圈两种。⑨ 实验室设备。⑩ 维护装备。⑪ 质量保证设备。⑫计算机监测系统。

在铝连铸连轧生产线的发展进程中，除计算机应用和自动化外，在液体金属处理、连铸和连轧条件、工艺控制和杆表面缺陷的连续探伤方面获得了许多改进：

（1）液体金属的处理。为了保证添加元素在铝液中的均匀性和减轻人工搅拌的劳力，在保温炉底采用电磁搅拌；选用评价高的熔剂在炉内进行精炼，除去铝液内的氢气和夹渣；在炉外继续对铝液进行炉外连续除气和过滤，炉内和炉外结合可取得更好的除气和除夹杂的效果。例如：Pechiney 公司的 Alpur 装置（标称处理能力可从 5t/h 到 60t/h，见图 3.4-9）采用氮气除气，具有除气和过滤的功能，可减少碱金属含量和除去夹杂；采用开孔泡沫陶瓷过滤砖（一个孔连一个孔的连续网状泡沫陶瓷），可从铝液中滤去氧化物、尖晶石、硼化物、碳化物和氮化物等非金属夹杂物，可以去除 2μm 的微粒，效率在 99%以上。泡沫陶瓷的体积空隙度为 85%～90%。这些装置现已有相应的中国制造。

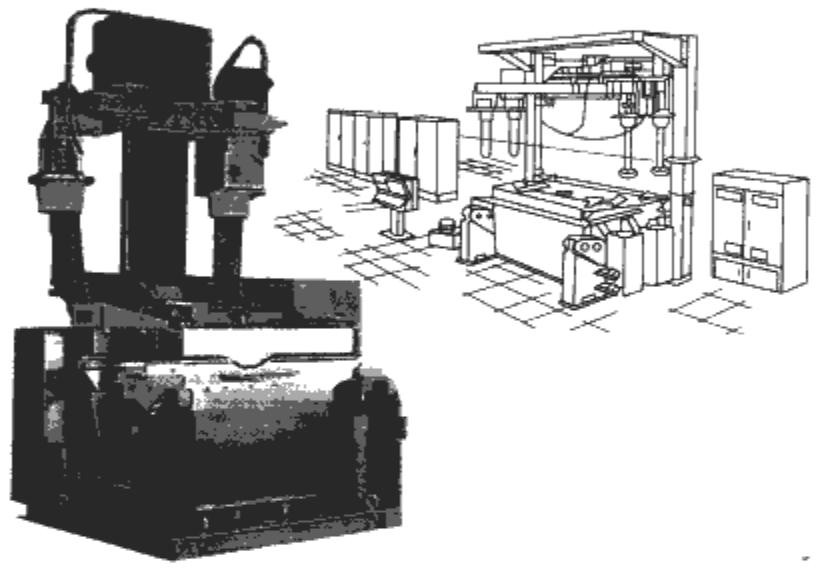


图 3.4-9 Alpur 除气过滤装置示意图

（2）浇铸和轧制条件的改进。用计算机辅助工程分析（CAE）对每个合金成分进行研究，开发出合适的凝固和冷却条件；用计算机辅助工程分析对轧制条件进行改进。

（3）工艺控制。通过计算机系统监测和控制工艺参数、检查数据和生产数据用于计算物料平衡（配料）。

对工艺参数的控制，采集 50 个工艺参数，每 2s 由计算机检查一次。对不同的铝（和铝合金）牌号由计算机显示其合适的生产条件，如条件不符，由计算机系统指导操作人员调整到特定的标准范围。

采用一个分离系统对整条生产线 30 个轴承的振动数据进行监测和记录，以免轴承故障而引起突发事故。

为了检查控制，对生产的每捆杆收集检查数据，根据数据立即自动地确定其质量，并进行分级。

对生产的控制，包括每捆杆的质量、生产标准和合金成分等。

当生产不同牌号的铝和铝合金时，跟踪加入物料（锭、废料和中间合金）和产出物（杆和切掉的废铸条）之间的平衡，进行物料平衡计算。

对生产成本的控制，密切监测和报告生产线的效率、能源消耗和劳动力成本。

上述的铝连铸连轧生产线已不仅能生产导电用的纯铝杆，而且也能生产各种不同的机械用铝合金杆，有关品种如表 3.4-9 所示。

表 3.4-9 铝和铝合金的品种

合金组别	型 号	应用举例
高纯铝	99.7%～99.99%铝	电容器
纯铝	电工铝，标准铝，1070，1080，1050，1100，1200	电线电缆，架空导线，"康仿"挤压，钢的脱氧，铆钉，冲挤
铝—镁—硅	6201，SI26，I-33，6063，6061，6151，6110	高强度架空导线，地线，护线条，栅栏，机械零件
铝—锆	60TAL，58TAL，60UTAL，58UTAL，KTAL	耐热铝合金架空导线
铝—镁	5154，5052，5056，5356，5083，5183，5019	电缆屏蔽编织线，焊丝，拉链，铆钉，栅栏，螺钉，机械零件
铝—铜	2011，2017，2014	螺钉，铆钉，螺栓
铝—锰	3003，3804	热喷射，冲击
铝—硅	4043	焊丝
铝—锌	7072，7050，7075	机械零件，热喷射
其 他	6101	电缆屏蔽编织线
	1110(Aluflex)	柔软电缆用线
	1199	电子应用，金属和塑料的镀层

3.2 铝液精炼、过滤及其效果

对铝液的精炼和过滤，不仅为了提高电工铝导体的性能和质量，而且也是为了生产小尺寸的型线、圆铝线和细铝线的工艺需要。

由电解铝厂从电解槽中取出的电解原铝液，其中的含氢量是很高的（密度熔用铝锭经重熔后铝液中的含氢量高得多），见表 3.4-10。因此，由此种铝液直接生产电工用铝杆，加强精炼是必需的。

表 3.4-10 电解原铝液的含氢水平及精炼效果

测氢 / 原铝液	原铝液温度（℃）	原铝液含量（mL/100g）	精炼效果（%）	精炼方式及熔剂
精炼前	840	1.29	42	在抬包内进行，用3‰1号熔剂
	805	1.08		
	775	0.90		
精炼后	730	0.52		
	718	0.48		

重熔用铝锭，在电缆厂重熔后生产铝线锭（制造大尺寸型材）或经连铸连轧生产电工铝杆时，铝液在一个熔铸周期中，在保温炉内铝液的含氢量是有变化的，这启示我们应注意对炉子的设计和合适的工艺操作。表 3.4-11 和图 3.4-10 为在保温炉内 99.7%铝的铝液在一个熔铸周期含氢量的变化。此外，精炼剂的选择和使用系统的防潮会影响精炼效果，甚至精炼铝液的含氢量比不精炼的还多，这应引起生产者的重视。在连续挤压铝护套电缆用的挤压铝锭生产中，如果铝液不精炼或精炼不良，将引起铝护套电缆连续挤压过程中铝护套管管壁的穿孔；在小规格铝扁线生产中（如4.54mm×10.8mm、2.63mm×10.1mm 小铝扁线）如果铝液精炼不良或不精炼，小铝扁线在 480℃退火 4h 后表面会出现连续起泡的现象；在细铝线生产中，因铝液精炼不良，将因退火起泡和气孔而致使断线大量增加，在这种情况下更应注意对铝液的精炼和过滤。

表 3.4-11 试验条件、生产操作、精炼和测氢

试验条件	竖炉熔化→保温炉→半连续浇铸（100×100mm）铝线锭
一个熔铸周期中99.70%铝液含氢量的变化	1. 7：00 保温炉装满 4t 铝液
	2. 9：30 铝液 752℃，测氢
	3. 10：57 铝液 738℃，测氢
	4. 11：12 铝液 720℃，测氢，然后用 1 号精炼剂块精炼
	5. 11：17 精炼完、闭炉门
	6. 11：25 铝液 716℃，测氢
	7. 11：35 纯氮精炼
	8. 11：50 吹完氮，扒渣
	9. 11：55 铝液 696℃，测氢；然后喷油提温
	10. 12：15 停止提温，出炉浇铸
	11. 12：53 铝液 715℃，测氢
	12. 12：57 喷油提温
	13. 13：15 停止提温，铝液 706℃，测氢
	14. 13：40 浇铸完毕

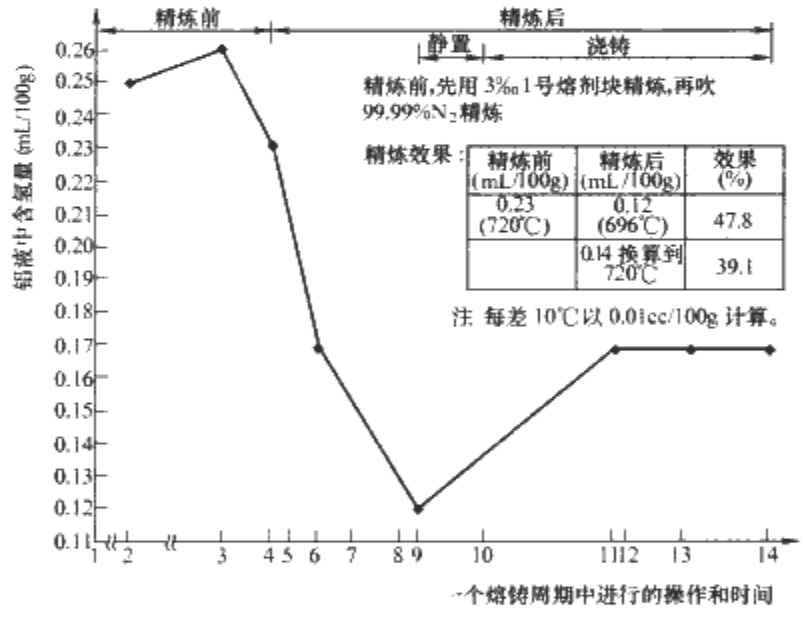


图 3.4-10 在工业生产条件下保温炉内一个熔铸周期中在 99.7%铝的铝液内含氢量的变化

如表 3.4-12 和图 3.4-11 所示，炉内精炼对电导率有影响；炉外精炼和过滤对铝线的电导率也有影响，由表 3.4-13、表 3.4-14、图 3.4-12 和图 3.4-13 可以表明：炉外精炼无论采用何种精炼手段，对提高铝的电导率都有效果，它使电导率正态分布曲线向上限推移，低限值有较大提高。综合考虑，精炼可以提高电导率（0.2～0.3）%IACS，这绝不是一个小数，是很有意义的。显而易见，电导率的提高是精炼除气和除夹杂的结果。由于电导率主要受到铝的成分等因素的影响，因此各组试样电导率的增值不尽相同，单纯地看平均增值并不能完全反映其实质。例如精炼前铝液含氢较多，铝液脏，这样精炼后电导率的平均增值可能要大些，反之可能小些。从曲线分布来看，精炼后数据分布集中，说明制品电导率稳定。这对处于标准及格线（电导率等于 61% IACS）边缘的制品而言就显得格外重要。

表 3.4-12 在炼铝厂原铝液混合和在电缆厂铝锭重熔铸锭精炼对电导率的影响

工业用纯铝的线材	试样编号（对）	铝（不小于）（%）	主要杂质（%）			微量杂质（%）				
			Si	Fe	Cu	Ti	V	Mn	Cr	总和
精炼	211	99.5	0.12	0.36	0.003	0.002 0	0.001	0.002 6	0.000 7	0.006 3
不精炼	210	99.5	0.12	0.36	0.003	0.002 1	0.004	0.002 1	0.000 4	0.008 6
精炼	1～42	99.6	0.09	0.27	0.001 5	—	—	—	—	—
不精炼	1～63	99.6	0.08	0.27	0.001 7					
精炼	1～34	99.5	0.09	0.29	0.002 0	—	—	—	—	—
不精炼	1～30	99.5	0.10	0.30	0.001 6					

注 1. 在电缆厂铝（线）锭经重熔后铸成精炼和不精炼的铝线锭：试样 211、210 来自炼铝厂同一批不精炼的 100mm×100mm 铝线锭（1－100），再经电缆厂重熔后铸造成 100mm×100mm 的 211（精炼）和 210（不精炼）铝线锭。对 211 试样在重熔时进行了比较充分的精炼（见注 2）和执行了合理的操作。

2. 211 精炼铝线锭的工艺条件为：1－100 锭重熔，用 3.4‰1 号熔剂精炼，精炼温度 740℃，静置 30min，浇铸温度 710℃，在整个浇铸过程 4t 铝料在保温炉中保温，不喷油提温，直至浇铸完毕。

3. 在炼铝厂原铝液经混合炉铸成精炼和不精炼的铝线锭：试样 1－42 和 1－63、1－34 和 1－30 来自同一批原铝液。分别在炼铝厂混合炉内铸成 1－63 和 1－30 以及 1－42 和 1－34 的不精炼和精炼的 100mm×100mm 铝线锭。

4. 所有试样的 100mm×100mm 铝线锭经加热后在回线式轧机上轧成 ϕ9.0±0.5mm 的铝杆，然后在非滑动式 8 模拉线机上按正常生产工艺拉成各种线径的硬铝线。

为了提高铝的内在质量，在炉外可对铝液进行连续过滤处理，以进一步除去铝液中的夹杂，而过滤的方式有许多，如泡沫陶瓷砖过滤、双层或单层玻璃丝布过滤和球过滤等，都可起到很好的作用。现以图 3.4-14 球过滤方式为例，在生产条件下，经 10h 试验，其结果如表 3.4-15 和表 3.4-16 所示。从中可以看出：

（1）对除去铝中的夹杂物有明显的作用（从铸条切片看）。

（2）有助于改善铝的电导率，球过滤对改善电导率的效果优于玻璃丝布过滤。

（3）拉铝线的断头率明显减少（特别拉细线时），导线表面质量提高。因此，为了提高拉细铝线的工艺性能，必须加强对铝液的精炼和过滤，包括炉内和炉外。

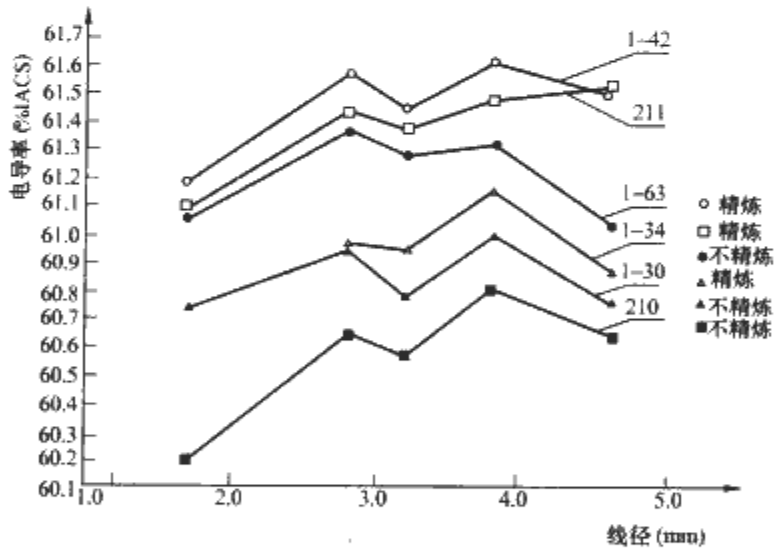


图 3.4-11 精炼与不精炼铝线直径与电导率的变化

表 3.4-13 炉外精炼、过滤及它们综合试验的材料和条件

精炼和过滤	所用材料成分（%）			试验条件
	Si	Fe	Ti、V、Mn、Cr 之和	
炉外氮气连续精炼铝液	0.087	0.165	0.003 45	99.99% 氮气，SiC 透气砖（粒度 8～16 目），在连铸机上浇包前的流槽上连续精炼
双层玻璃丝布过滤铝液	0.073 4	0.146	0.010 18	在上浇包用玻璃丝布袋过滤
综合氮气精炼和双层玻璃丝布过滤铝液	0.074 4	0.141	0.007 21	上列两者的综合对铝液进行精炼和过滤

表 3.4-14 炉外精炼、过滤及它们综合试验的生产统计结果

精炼和过滤 \ 结果	平均电导率	从抽样试验电导率分布的统计图分析
单独炉外流槽氮气连续精炼	略有提高，约高 0.1%IACS	通氮后有 98.3% 达到了 61.5% IACS 以上，而不通氮的只有 83.7% 达到 61.5% IACS，提高了 14.6%
单独双层玻璃丝布过滤	有所提高，约高 0.19%IACS	过滤后电导率达 61.5% IACS，占 85.3%，比过滤前提高 12.6%。统计图表明，过滤的铝电导率普遍向高电导率方向靠近
综合上列精炼和过滤	比单独精炼或过滤作用更明显一点	电导率分布更为集中，更靠近高档：电导率 100% 达 61.6% IACS，比不精炼和过滤的高 4.2%；电导率达 61.8%IACS，占 94%，比不精炼和过滤的高 14.7%

注 生产方式为连铸连轧，ϕ10.5mm 杆在非滑动式拉线机上拉线，比较试验线径 2.8mm。

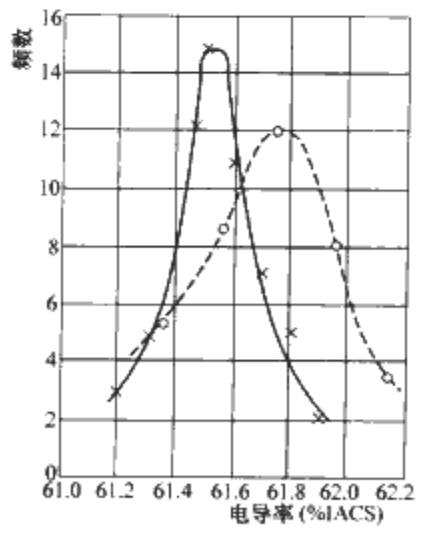


图 3.4-12 过滤前后电导率的变化

—○—玻璃丝网过滤（N：75；$\overline{X}$：61.72%IACS；σ_{n-1}：1.03×10^{-4}）；

—×—未精炼（N：75；$\overline{X}$：61.53%IACS；σ_{n-1}：8.01×10^{-5}）

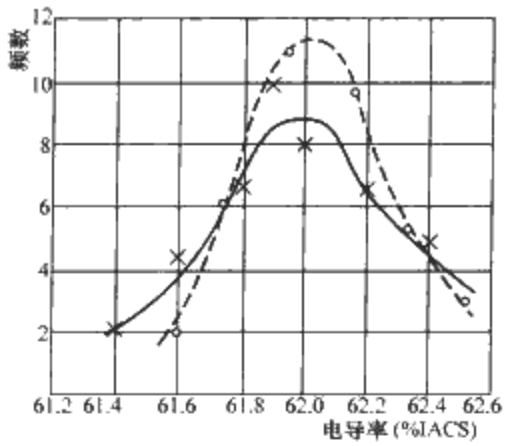


图 3.4-13 通氮与过滤对电导率的作用

—○—通氮加过滤（N：67；$\overline{X}$：62.04%IACS；σ_{n-1}：9.38×10^{-5}）；

—×—未精炼（N：73；$\overline{X}$：61.98%IACS；σ_{n-1}：1.27×10^{-4}）

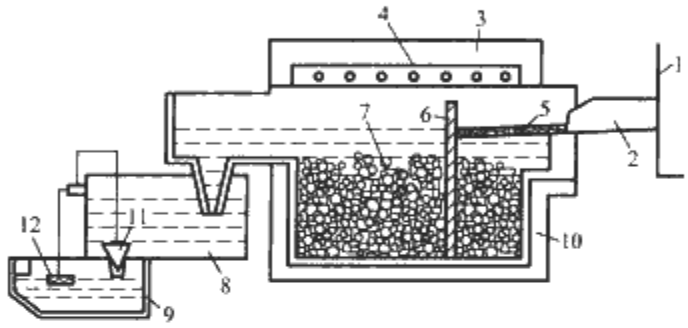


图 3.4-14 铝液球过滤试验装置示意图

1—保温炉；2—流槽；3—盖；4—电热棒（25kW）；5—熔剂；6—隔墙；7—ϕ6～19mm 氧化铝球；8—中间包；9—控制包；10—衬；11—调节塞；12—浮标

表 3.4-15 球过滤对铝线电导率影响的统计

材料	试样编号	线径(mm)	抽样数(个)	电导率在61%IACS以上所占百分数	平均电导率(%IACS)	化学成分(%)			
						Si	Fe	Cu	Ti、V、Mn、Cr之和
基础铝径球过滤	D28	2.07	60	78.3%	61.16	0.06	0.17	0.001 8	0.020 12
基础铝	D5	2.29	60	28.3%	60.81	0.05	0.17	0.001 3	0.018 4
	D22	2.13	48	43.8%	61.00	0.066	0.15	0.001 1	0.019 1

表 3.4-16 球过滤与不过滤铝线拉细线的试验结果

比较 / 线径（mm）	球过滤铝线(硬线)	常规(不过滤)铝线(硬线)
起始线径	1.7	1.7
到 1.0mm 时	无异样	出现毛刺和起皮
到 0.72mm 时	断头率 13.9%，比右列断头率减少 1 倍以上	断头率 30.8%
到 0.70mm 左右时	材料的内在缺陷已大量暴露，故断线次数增加，从断口的情况看多半属夹杂断线	
到 0.3mm 时	更光亮	光亮

3.3 电工铝导体的稀土优化综合处理技术

稀土优化是在连铸连轧生产电工铝杆的基础上，将稀土（以铈或镧为主的混合稀土金属）以铝—稀土中间合金的形式加入含硅较高的非电工级铝（如 99.70 铝等）进行工艺处理的一种方法。它可有效地降低硅对电导率的有害作用。

硼化是针对铝中 Ti、V、Mn、Cr 对电导率的有害作用而进行工艺处理的另一种方法。它可有效地降低 Ti、V、Mn、Cr 对电导率的有害作用。

控铁是在不降低或少降低铝导体电导率的条件下，通过加铁以控制对铝导体所需的抗拉强度。在电工铝导体的硬铝线生产（应用最广）中，电导率和抗拉强度始终是一对矛盾，如何妥善处理好这对矛盾是在电工硬铝线生产中的关键之一。

稀土优化综合处理是对前三者一种或二种甚至三种的综合处理，它的使用主要取决于原材料、导体制品的要求和最佳的技术经济效果。铝锭的成分对导体性能，特别是电导率具有决定性的作用。国外采用铝纯度为 99.81%～99.66%、含硅量在 0.05%左右的超高纯、高纯、中高纯和中低纯铝生产电工用铝杆。我国电缆工业进厂铝锭品位比较杂，有大量国产非电工级铝锭、少量符合中国电缆工业要求的电工级铝锭、硅含量较低而有害微量杂质元素较高的非电工级进口铝锭、还有用进口氧化铝或进口氧化铝和国产氧化铝搭配混合使用的国产非电工级铝锭及从线路上换下的废铝线等。为了稳定地工业化生产合格的产品，首先要分析铝的主要杂质元素 Si、Fe、Cu、Ti、V、Mn、Cr7 种元素的含量，通过配料，充分利用进厂原材料的适用性，取长补短，控制铝液的成分，提高产品的技术经济效果，为以后在最佳技术经济条件下进行综合处理创造条件。兼顾原料成分、导线性能和导线用途，对铝液进行稀土优化处理、硼化处理及控铁处理：①稀土优化处理中，稀土加入量主要依铝中的含硅量而定，含硅量在 0.09%～0.13%之间加入适量稀土技术经济效果最佳，由此，扩大了电缆工业所需原材料铝的来源。采用稀土优化可缓和冷作硬化对增加电阻率（降低电导率）的敏感性和提高铝的电导率，同时可细化晶粒，改善在连铸、连轧时的热裂敏感性，在铁硅比小于 1.3 甚至小于 1 的情况下不影响连铸连轧和拉线的正常生产。②硼化处理。硼在铝中可降低 Ti、V、Mn、Cr 微量杂质元素对电导率的有害影响，它是不能用稀土优化来代替的，进口铝锭或用进口氧化铝生产的国产铝锭，普遍含 Ti、V、Mn、Cr 较高而含硅较低，一般国产铝则相反，所以从技术、经济两方面考虑，合理搭配使用，可实施低硼处理、甚至微硼处理。③控铁处理，当原料铝中含铁量偏低时，在保证电导率合格条件下适量加铁，以提高硬铝线的抗拉强度，特别在生产大直径铝线，如三峡工程用 ACSR720/50 导线的硬铝线直径为 4.53mm 时尤为重要，但如加入过量的铁，不仅电导率下降，而且也影响耐腐蚀性能。控制铝中的铁是不可忽视的，控制铁可增强基体，且可减少拉线道次（和用 10mm 以上的铝杆拉线相比）。根据铝锭成分、配料和导线性能的要求，在实际生产中可能不处理，用一种或两种或三种处理。对处理用的中间合金的选购或制作，直接影响处理技术经济效果，铝稀土中间合金可利用电缆厂的工艺废铝自行制造。

在电工铝导体生产中质量监控对稳定生产起着重要的作用，为此应建立以铝杆为中心的全面质量控制体系。这个体系主要包括工艺监控、制品监测和质量分三个部分。工艺监控的主要环节是成分、温度和冷却。为此应采用经济、实用的炉前快速分析。制品监测的主要内容是对铝杆的电导率、抗拉强度和伸长率，及时检测、统计和反馈，与工艺监控相互配合。铝杆质量分等管理，在电线电缆厂里制造架空导线用的硬铝线质量要求最高，线芯用铝线质量要求次之，前者

不同的线径对圆铝杆要求也不尽相同，因此通过分等使用可达到物尽其用，充分利用原材料的目的。

(1) 稀土化处理及其效果。稀土化处理可提高铝的电导率。图 3.4-15 为 9.5mm 铝杆控制其杆抗拉强度为 103MPa 左右，铝杆电导率与以铈为主的混合稀土加入量的关系。Ⅰ区——铝杆电阻率在 0.027 9～0.028 01Ω·mm²/m·20℃[电导率 (61.79～61.55)%IACS] 范围内。Ⅱ区——铝杆电阻率不大于 0.027 90Ω·mm²/m·20℃ (电导率不小于 61.79%IACS)。因此，稀土的加入量不仅与硅含量有关，而且也与铁含量有关。根据图 3.4-15 的Ⅰ区和Ⅱ区可选择具有最佳技术经济效果的稀土加入量。采用以铈为主的混合稀土金属，处理含硅量为 0.09%～0.13%的非电工级 99.70 铝可获得最佳的技术经济效果。

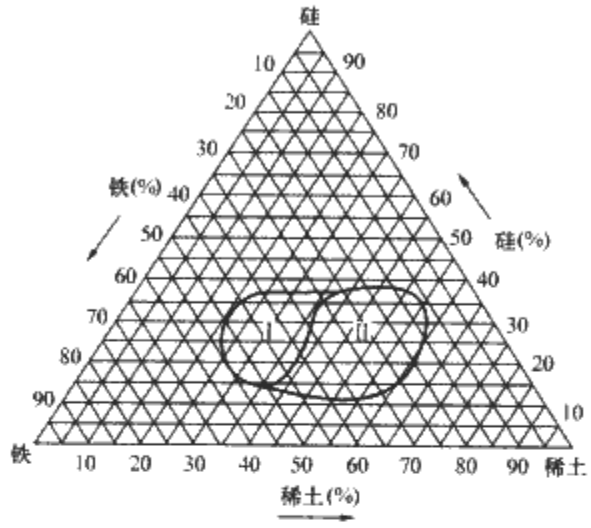


图 3.4-15 直径 9.5mm 铝杆的电导率与稀土加入量的关系
(铝液中铜含量不大于 0.005%，钛、钒、锰、铬含量之和不大于 0.01%；图中硅、铁、稀土之和 100%)

稀土化处理与硼化处理同时进行，它们各自都可提高电导率，但两种处理同时应用对提高电导率无最好的叠加效果。表 3.4-17 示出了采用两种原料铝，第一种含硅比较低而 Ti、V、Mn、Cr 之和大于 0.01% (实测为 0.011%)，第二种含硅比较高而 Ti、V、Mn、Cr 之和小于 0.01% (实测为0.001 42%)。在同样工艺条件下进行不处理、硼化处理、稀土化处理和同时进行稀土化处理和硼化处理的对比试验。对第一种材料，稀土化处理与硼化处理同时进行时，先加铝硼中间合金，后加铝稀土中间合金。对第二种材料，稀土化处理与硼化处理同时进行时，用重熔稀土铝锭，然后再进行硼化处理。由表 3.4-17 可以看出对第一种材料分别采取稀土化处理和硼化处理都可提高电导率，效果大致相当。对这两种材料同时进行两种处理，对提高电导率无叠加效果。这可能是由于稀土与硼形成了化合物，使硼化效果下降。这个结果也告诉我们为达到同一提高电导率的目的，选用什么样的处理方法、加入稀土铝中间合金或硼铝中间合金的数量和两者的价格是不同的，所以经济效果也是不同的。

表 3.4-17 稀土化处理、硼化处理对提高电导率的效果比较

原材料	杂质含量 (%)							硼化处理	稀土化处理	φ9.5 铝杆性能①		
	Si	Fe	Cu	Ti	V	Mn	Cr			抗拉强度 (MPa)	电阻率 (Ω·mm²/m)	电导率 (%IACS)
第一种	0.063	0.182	0.000 6	0.006 2	0.001 65	0.002 5	0.001 05	—	—	104	0.028 01	61.55
	0.063	0.182	0.000 6	0.006 2	0.001 65	0.002 5	0.001 05	B—Al	—	101	0.027 73	62.17
	0.063	0.182	0.000 6	0.006 2	0.001 65	0.002 5	0.001 05	—	Re—Al	100	0.027 79	62.04
	0.063	0.182	0.000 6	0.006 2	0.001 65	0.002 5	0.001 05	B—Al	Re—Al	102	0.027 71	62.22
第二种	0.10	0.074	0.002 6	0.000 4	0.000 3	0.000 22	0.0005	--	Re—Al	105	0.027 75	62.13
	0.10	0.074	0.002 6	0.000 4	0.000 3	0.000 22	0.0005	B—Al	Re—Al	107	0.027 74	62.15

① 上列数据为 12 次平行试验平均值。

稀土优化处理的铝杆和铝线在计算电阻率时仍可采用电阻温度系数为0.004 07(1/℃)(R 型软线，铝杆)和0.004 03(1/℃)(其余型号的硬线和半硬线)。据研究表明：经稀土化处理的铝杆，拉制 2.21mm 和 2.51mm 的硬铝线，它们在 20℃时的电阻率和电阻温度系数分别为0.027 95Ω·mm²/m、0.004 10(1/℃)和0.027 93Ω·mm²/m、0.004 09(1/℃)。数据符合 IEC 468(1974)《金属材料电阻率的测量方法》中的一般规律。

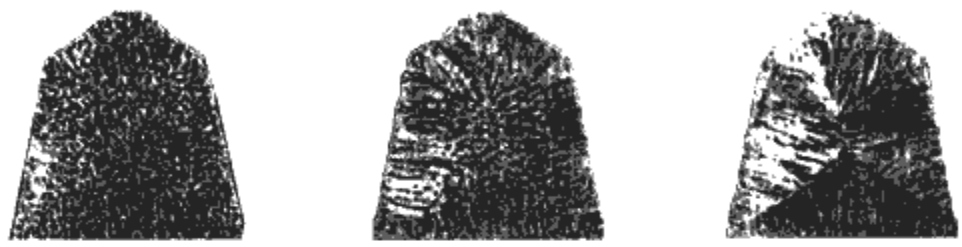
稀土化处理对铝杆的强度没有明显的增强效果。采用不同的稀土加入量，在连铸连轧生产线上生产直径 9.5mm 铝杆，测定其机电性能表明：稀土化处理对抗拉强度并无明显的提高，这可能因为稀土在铝中的固溶度很小 (不大于 0.05%)，因而无明显的强化作用。另外，连轧铝杆的强度在一定程度上，可根据需要调控工艺过程的温度、冷却状况和生产速度，这些可控因素对强度的影响要大于稀土对强度的影响，因此，稀土就显不出对铝杆强度有明显的强化作用。

稀土化处理对工艺性能的影响，由于稀土含量不高，因此稀土化处理对铝的熔点没有明显的影响，浇铸温度也无明显变化。因为稀土对硅具有变质作用，可改善铝连铸连轧时的热裂敏感性，从而改善了铝的工艺性能，即使在铝中的铁、硅比小于 1.3 的情况下也不致造成热裂断条、断杆和拉线断线。因此，在控制连铸连轧工艺，保证铝杆强度的条件下，对铁硅比小于 1.3、甚至小于 1.0 的铝进行稀土化处理，更有利于提高铝导体的电导率。

稀土化处理、硼化处理对连铸连轧铸条结晶组织的影响，从理论上说结晶细似乎对提高铝线的电导率是无益的，实际中的影响还无法体验，但晶粒细对加工是有益的。在连铸连轧条件下，铝的结晶是在旋转模 (轮) 中完成的。因此，其结晶组织受到诸多因素的影响，不管是 99.7 铝 (见表 3.4-18) 或经稀土化处理的铝 (见表 3.4-19) 或经硼化 (低硼) 处理的铝 (见表 3.4-20) 都可形成粗、较细和细晶的组织，这取决于工艺条件，其中铸速、铝液温度、冷却水温度及其冷却效果是重要的因素。在连续生产的过程中，随着时间的进行，由于工艺条件在允许范围内变化，铸条的结晶组织也会随之变化。在硼化 (低硼) 处理条件下 (含硼为 0.006 3%～0.010 8%的铝)，硼对细化晶粒无明显的作用 (见表 3.4-20 和表 3.4-21)。在稀土化处理条件下 (以铈为主的混合稀土金属，含稀土为 0.15%)，稀土对细化晶粒有明显的作用 (见表 3.4-21)。

表 3.4-18 **99.7%铝的连铸连轧铸条的结晶组织**

材料	试样编号	铸条结晶	保温炉铝液(℃) / 上浇包铝液(℃)	冷却水(℃) / 总水压(MPa)	结晶轮(℃) / 钢带(℃)	铸条温度(℃)	Si(%)	Fe(%)
99.7铝	1	细	740 / 700	25.0 / 0.25	100 / 120	520	0.077	0.198
99.7铝	002	较细	750 / 700～710	18.0 / 0.32	70～75 / 100	490～510	0.098	0.20
99.7铝	3	粗	750 / 690	22.0 / 0.32	100～110 / 120～140	520	0.096	0.195



试样1　　试样2　　试样3

表 3.4-19 **稀土化处理铝的连铸连轧铸条的结晶组织**

材料	试样编号	铸条结晶	保温炉铝液(℃) / 上浇包铝液(℃)	冷却水(℃) / 总水压(MPa)	结晶轮(℃) / 钢带(℃)	铸条温度(℃)	RE(%)	Si(%)	Fe(%)
稀土化铝	9	细	750 / 690～700	25.0 / 0.25	120 / 120	510～520	0.136	0.135	0.22
稀土化铝	25	细	750 / 710～720	25.0 / 0.25	110 / 140	500	0.069	0.054	0.155
稀土化铝	16	较细	760 / 720	24.0 / 0.25	110 / 140	500～510	0.177	0.122	0.201
稀土化铝	10	粗	760 / 690～710	25.0 / 0.23	110 / 130～140	490～510	0.172	0.117	0.234



试样9　　试样25　　试样16　　试样10

注　RE—以铈为主的混合稀土金属。

表 3.4-20 **硼化处理铝的连铸连轧铸条的结晶组织**

材料	试样编号	铸条结晶	保温炉铝液(℃) / 上浇包铝液(℃)	冷却水(℃) / 总水压(MPa)	结晶轮(℃) / 钢带(℃)	铸条温度(℃)	B(%)	Si(%)	Fe(%)	Ti、V、Mn、Cr之和(%)
硼化铝	14	粗	740 / 710	24.0 / 0.25	110 / 140	510～520	0.009	0.066	0.193	0.011 22
硼化铝	26	粗	740 / 700	24.0 / 0.25	110 / 140	500～510	0.006 3	0.061	0.181	0.011 20
硼化铝	27	粗	760 / 710～720	22.0 / 0.25	110 / 140	510～530	0.010 8	0.048	0.205	0.011 20



试样14　　试样26　　试样27

表 3.4-21 稀土化、硼化(低硼)处理铝的连铸连轧铸条的结晶组织比较

材料	试样编号	铸条结晶	保温炉铝液(℃) / 上浇包铝液(℃)	冷却水(℃) / 总水压(MPa)	结晶轮(℃) / 钢带(℃)	铸条温度(℃)	B(%)	RE(%)	Si(%)	Fe(%)
基体铝	13	粗	750 / 700～710	24 / 0.25	110 / 140	520	—	—	0.193	0.062
硼化铝	14	粗	740 / 710	24 / 0.25	110 / 140	510～520	0.009	—	0.193	0.062
稀土化铝	15	细	750 / 690～700	24 / 0.25	110 / 140	500	—	0.15	0.193	0.062



试样14　　试样13　　试样15

注　RE—以铈为主的混合稀土金属。

(2) 硼化处理及其效果。硼化处理可提高铝的电导率。表 3.4-22 示出了硼化对铝线电导率的影响。图 3.4-16 示出了硼化剂用量对 99.7%铝（硅小于 0.08%，钛、钒、锰、铬之和大于 0.01%）硼化效果的生产抽样统计。硼化处理对导线疲劳性能的影响，如表 3.4-23 和图 3.4-17 所示。

表 3.4-22 硼化对铝线电导率的影响

材料	试样编号	电阻率（Ω·mm²/m）/电导率（%IACS） 线径（mm） 2.8	3.2	3.7	4.4
基础铝	D5	0.028 046 / 61.47	0.028 107 / 61.34	0.028 065 / 61.43	0.028 030 / 61.50
硼化铝	D6	0.027 831 / 61.94	0.027 871 / 61.85	0.027 800 / 62.01	0.027 837 / 61.93

注　1. 基础铝成分：0.17%Fe、0.05%Si、0.001 3%Cu、ΣTi、V、Mn、Cr=0.018 4%。

2. 工艺：基础铝熔化→硼化→连铸连轧。

3. 硼化用硼量：0.003 5%B。

一般而言，根据需要经硼化（低硼甚至微硼）处理后导线的电导率可提高（0.42～1.0)%IACS。经硼化处理的铝导线强度和疲劳性能比未经硼化处理的有所提高，但并不显著，据统计平均抗拉强度可提高约 3MPa。至于硼化对晶粒组织的影响见本章 3.3 内容。

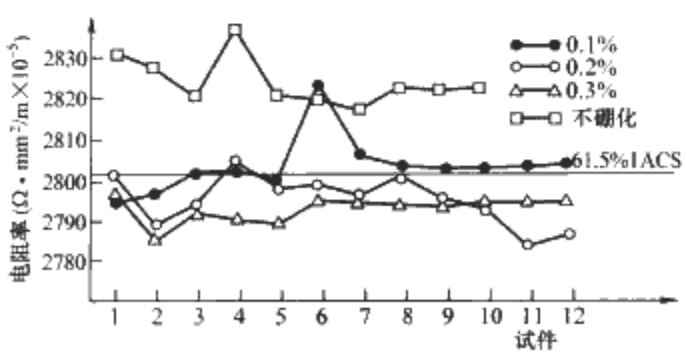


图 3.4-16 硼化剂用量对 99.70%铝（硅小于 0.08%，钛、钒、锰、铬之和大于 0.01%）硼化效果的生产抽样统计

表 3.4-23 硼化对导线疲劳性能的影响

材料	试样编号	线径(mm)	弯曲应力(MPa)	试验机偏转角(°)	试样数(根)	疲劳破坏总转数(次)	疲劳破坏平均转数(次)
硼化铝	D6	3.7	82.2	5	70	105 394	1506
基础铝经球过滤	D37	3.7	82.2	5	70	93 645	1338

注　1. 拉制 φ3.7mm 铝线，用 9.0mm 铝杆；试样长 370mm。

2. 0.17%Fe、0.06%Si、0.001 8%Cu、ΣTi、V、Mn、Cr=0.020 12%。

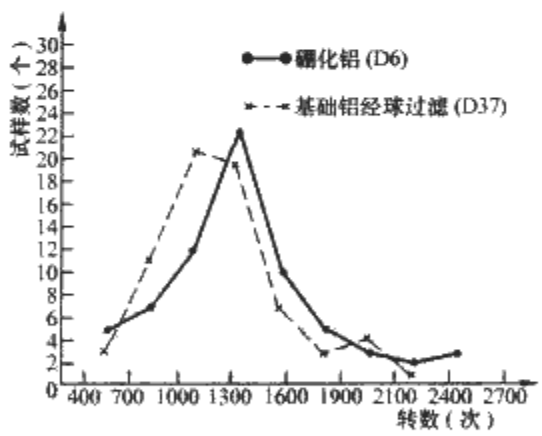


图 3.4-17 直径 3.7mm 硼化铝线与不硼化铝线疲劳对比试验疲劳破坏转数分布

(3) 控铁及其效果。在铝中控制加入少量铁（以铝铁中间合金方式加入），虽然热轧铝杆强度的提高并不很明显，但经冷拉（冷作硬化）的硬铝线可明显增加强度，影响硬铝线强度的因素甚多，除铝杆的强度外，拉线机的型式（滑动式或非滑动式）、拉线速度、冷却方式、润滑剂的温度等这些外来因素都影响铝线的强度，但控铁是具有实质性的内在增强因素，在生产中应有效地加以利用。图 3.4-18 示出了在不同含铁量下，铝线的抗拉强度与电导率的关系。

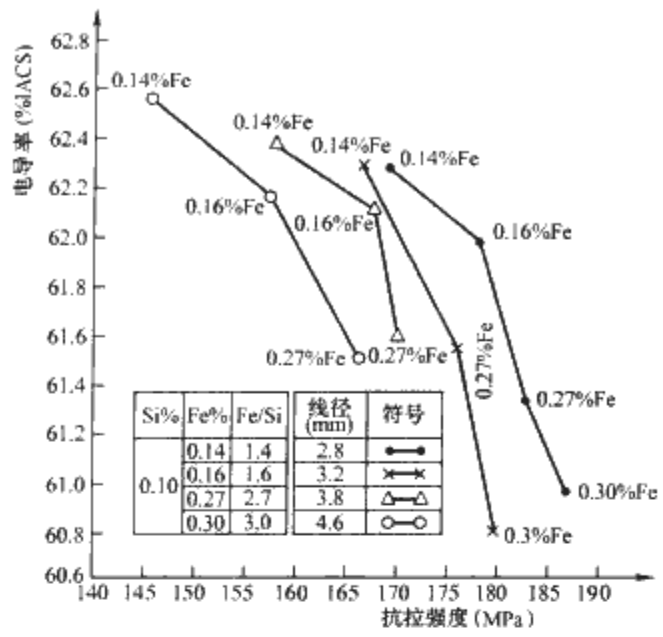


图 3.4-18　铝中含铁量的变化，
铝线抗拉强度与电导率的关系
（铝含硅 0.1%，由 100mm×100mm 铝线锭轧成 9.0mm 铝杆，非滑动式拉线机拉线，模匣润滑）

3.4　稀土对提高铝电导率的作用机理

稀土元素在铝中的奇妙作用引发了人们的兴趣，为了解释稀土提高铝电导率的原因，不少研究者曾进行探讨，较为普遍的看法是稀土元素与原来固溶在铝中的杂质形成了某种金属间化合物在晶界析出，使晶内杂质贫化，从而提高了电导率。但究竟形成何种化合物？其分布如何？现利用电子衍射和能谱分析相结合的方法，确定铝导体中稀土的存在形式，即稀土相的类型，并用 X 光衍射方法测定了几种导电铝杆的点阵常数差，以比较其固溶体中硅的含量，给出了稀土加入铝中确使铝固溶体中杂质硅含量下降，从而使电导率提高的实验数据。研究表明，纯铝锭和稀土铝锭的主要组成相都是 α 固溶体（铝基体）、沿晶界分布的长条相和分布于树枝晶间隙的颗粒状相。长条相都为 $FeAl_3$ 相，而颗粒相的成分、相结构却不尽相同，纯铝锭中颗粒相为体心立方结构（$a=12.548\times10^{-10}$ m）的 Fe_3SiAl_{12} 杂质相，加入稀土时，这种相溶入的铈量远高于材料中平均含量，其中硅的含量也明显增加，稀土铝锭的另一种颗粒相除了有 Fe_3SiAl_{12}，还包含简单正方结构的 $CeSi_2$ 相，在此复合相中铈、硅含量比前一种颗粒相中的含量更高。此外，在稀土铝锭中还发现有 Fe_3SiAl_{12} 与 Ce_5Si_3 相混杂共存的情况。以上试验结果说明，以铈为主的混合稀土元素与硅有很强的亲和力，它们加入铝中，易与硅一起溶入 Fe_3SiAl_{12} 杂质相中，当某一局部的铈、硅含量到达一定浓度后，便生成（Ce、Si）类化合物。显然，铈与硅的这些存在形式都使铝固溶体中溶硅量下降，尤其当铝中硅在 0.08%以上，而 Fe/Si 值又较低时，富铈混合稀土的加入对铝固溶体的减硅作用更为明显。

Fe 和 Ce 等基本不溶于铝，而 Si 能固溶，所以试样点阵常数的变化反映了固溶体中硅含量的变化。由于硅原子半径比铝小，所以点阵常数差越大表明铝固溶体中硅含量越少。所以铝杆电阻率与其点阵常数，亦即固溶体中的硅含量密切相关，铝固溶体中的硅含量较低时，铝杆的电阻率亦较低。表 3.4-24 示出了 5 种铝杆的化学成分、电阻率和点阵常数差。

表 3.4-24　五种铝杆的化学成分、电阻率和点阵常数差

试样序号	化学成分（%）			电阻率（Ω·mm²/m）	电导率（%IACS）	点阵常数差（1×10^{-1}nm）
	Si	Fe	RE			
No. 1	0.073 5	0.132	—	0.027 85	61.90	0
No. 2	0.098	0.140	0.123	0.027 74	62.15	+0.000 20
No. 3	0.144	0.117	0.233	0.027 96	61.66	+0.000 06
No. 4	0.148	0.165	0.135	0.028 19	61.15	−0.000 17
No. 5	0.151	0.147	0.162	0.028 35	60.81	−0.000 09

注　RE—以铈为主的混合稀土金属。

图 3.4-19 和图 3.4-20 示出了连铸工业纯铝和稀土优化铝铸条的金相组织。可以看出：两种铸条中的主要组成相都是 α 固溶体；两种铸条中的晶界长条相都为 $FeAl_3$ 相；分布于树枝晶间隙的颗粒状相（分形状有别的几种）则成分、相结构不尽相同。图 3.4-21、图 3.4-22 和图 3.4-23 示出了连铸工业纯铝和稀土优化铝铸条中颗粒相的透射电镜形貌像、电子衍射图和能谱图。

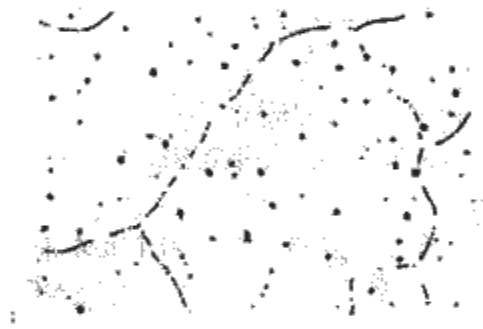


图 3.4-19　连铸工业纯铝铸条的金相组织（200 倍）



图 3.4-20　连铸稀土优化铝铸条的金相组织（200 倍）

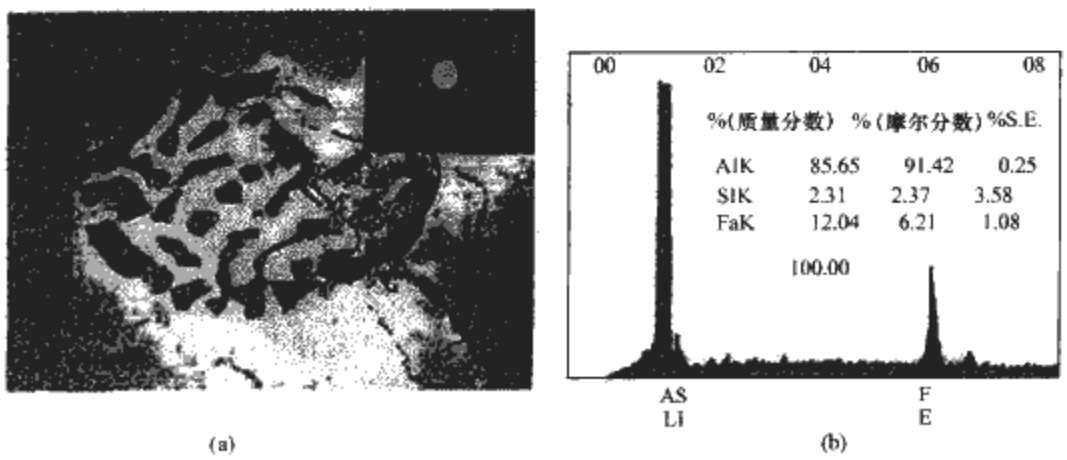


图 3.4-21　连铸工业纯铝铸条中颗粒相的透射电镜形貌像、电子衍射图和能谱图
（a）形貌像（14 000 倍）和电子衍射图（Fe_3SiAl_{12} 的［111］晶带）；（b）能谱图

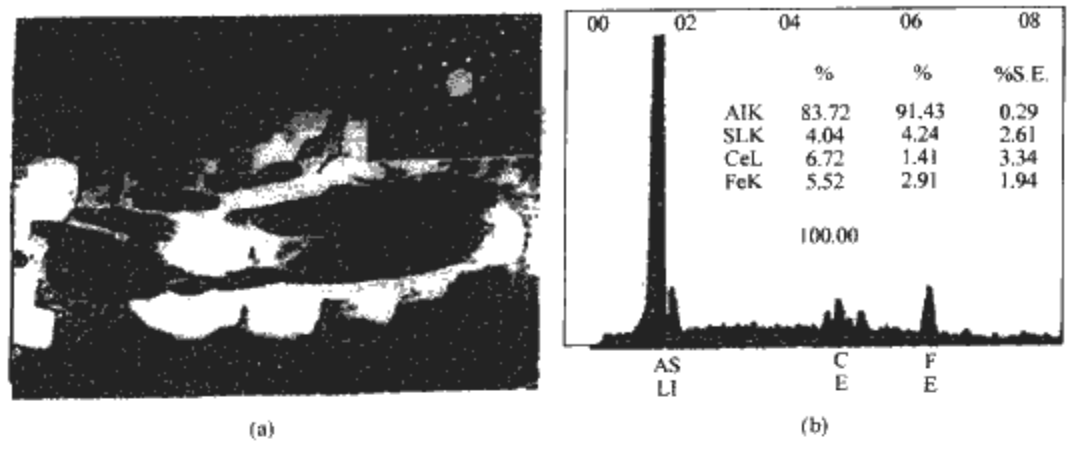


图 3.4-22 连铸稀土优化铝铸条中颗粒相的透射电镜形貌像、电子衍射图和能谱图
(a) 形貌像（14 000 倍）和电子衍射图（Fe_3SiAl_{12}的［111］晶带）；(b) 能谱图

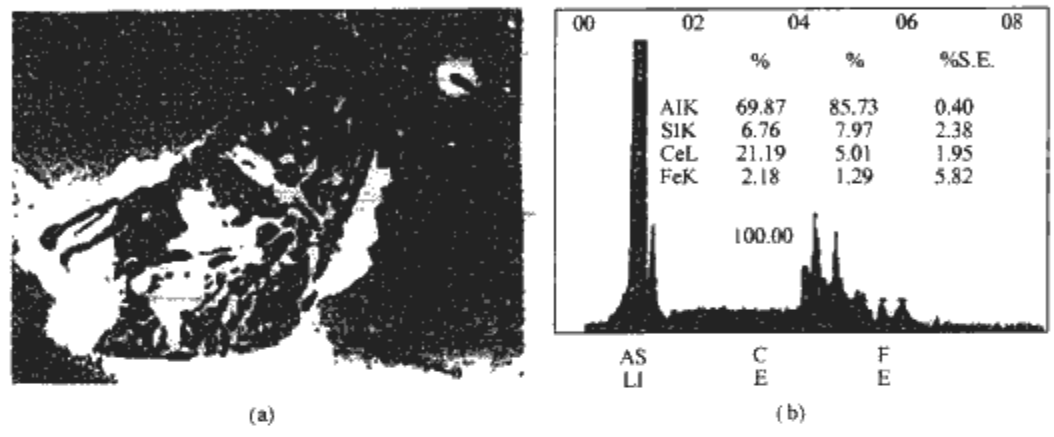


图 3.4-23 连铸稀土优化铝铸条中第二种颗粒相的形貌像、合成电子衍射图和能谱图
(a) 形貌像（72 000 倍）和合成电子衍射图（Fe_3SiAl_{12}的［111］晶带和 $CeSi_2$的［131］晶带）；(b) 能谱图

此外，还曾发现了 $FeSiAl_{12}$与 Ce_5Si_3 相混杂共存的情况，表明在含富铈混合稀土的铝导体中（Ce、Si）类化合物的形成亦非偶然。

由此，可以看出：以铈为主的稀土元素加入铝导体中，其主要存在形式有两种，一是与硅一起溶入 $FeSiAl_{12}$杂质相，二是形成（Ce、Si）类化合物；以铈为主的稀土元素的上述两种存在方式都使铝固溶体中硅含量下降，这是加入适量富铈混合稀土能够提高铝导体导电性能的主要原因。

4 电工铝线生产

4.1 电工硬铝线制造

电工硬铝线是用得最广泛的一种铝线，主要用于制造架空导线，这种线的性能主要应处理好电导率和抗拉强度的矛盾，尤其粗的硬铝线要求性能稳定、成品率高是比较难的。现以长江三峡电站直流超高压（±500kV）输电用架空导线［导线截面积 720mm²（45 × 4.53）/钢 50mm²］用的直径 4.53mm 硬铝线生产为例进行阐述。720mm² 导线，股线无接头的单根导线长度为 2500m，45 根 4.53mm 的硬铝线，其平均抗拉强度和单根硬铝线的抗拉强度分别不低于 165MPa 和 160MPa，45 根硬铝线抗拉强度的不均匀性不大于 20MPa。这些技术指标均属超国内和国际先进标准的苛刻要求。

在生产实践中，从直径 9.5mm（或 12.0mm）铝杆拉到成品用硬铝线的过程中，铝线的强度会提高，且线径越小加工率越大，抗拉强度增量 $\Delta\sigma_b$ 越大。即使拉同一种线径，还因拉线机机型、润滑方式、机头和模座是否冷却、润滑剂（循环）是否冷却、甚至还因单盘收线还是双盘收线等因素，可使单线抗拉强度有较大范围的波动。

下面是在生产 ACSR-720/50 三峡工程导线用直径 4.53mm 硬铝线时用的拉线机及对 1938 盘线的统计分析。生产中使用非滑动式六模和八模拉线机以及滑动式高速铝拉线机三种机型，均通过 6 个模子，拉线速度在 8～14m/s，不同的仅是前者为机头和模座冷却、模盒润滑、单盘收线；后者是循环润滑且润滑液控温、双盘收线。

六模、八模和高速拉线机用直径 9.5mm 铝杆的抗拉强度分别为 120～133MPa、117～128MPa 和 113～128MPa。铝杆经六模、八模和高速铝拉线机拉成直径 4.53mm 硬铝线，每盘铝线取约 2m 试样，两头各取一根试样做拉力试验，取平均值，它们的抗拉强度的增强量（$\Delta\sigma_b = \sigma_{b\Phi4.53} - \sigma_{b\Phi9.5}$）是分散的，数据经回归处理以后呈现的规律为：六模机增强 49MPa（样本 372）、八模机增强 52MPa（样本 330）、高速铝拉机增强 58MPa（样本 1236）。由此可以按杆的抗拉强度进行分等，供相应的拉线机使用，或者说，可有意识地生产适应抗拉强度范围的杆。同时，必须指出，为生产 ACSR—720/50 三峡工程导线，强行规定只准使用某种拉线机机型的做法也是不科学的。

由三种拉线机生产的直径 4.53mm 硬铝线共 1938 盘，每盘取两个抗拉强度测定值的偏差分析表明：对于六模、八模来说，当测定值之差为 5MPa 时，产量在 96%左右，而高速铝拉机则为 80%；若高速铝拉机产量达 96%时，而相应测定值之差达 10MPa。究其原因，可以发现高速铝拉机是双盘收线，取的 2m 左右长度的样品线正是在割断处，由于铝线产生拉伸引起力学性能发生变化，所以该样品线两端抗拉强度波动较大。因此，明确规定，对高速铝拉机下来的线，按常规取样而测定值之差大于 5MPa 时，重新取样测定，结果以后者为准。还注意到，绞线时产生铝线断股，其中较多原因是高速铝拉机双盘收线时，因排线不当造成夹

线。所以要避免夹线的产生，减少绞线长度达不到规定交货长度的遗憾。

根据1938盘硬铝线抗拉强度分布的情况，如果将其中数字作以下处理：相邻两个数合并，如175MPa与176MPa的盘数相加，以此类推。那么，盘数与抗拉强度作图，将得到正态分布图，其峰值为175～176MPa处。由此，可以算出，161MPa及以下为6盘、占总数的0.31%，190MPa及以上为7盘、占总数的0.4%，这两端的铝线之和为13盘占总数不到1%。如果以176MPa作为界线，162～176MPa计994盘、占总数的51.3%，177～189MPa计931盘、占总数的48%，以此分段，符合上述的不均匀值小于20MPa的要求。如果将不均匀值放宽到不大于30MPa，那么，只要剔除抗拉强度高低两端外铝线，可不必进行绞线机上盘之前的配盘了，无疑可减少工作量。

生产720/50导线绞线机使用笼绞机还是框绞机，没有必要作硬性的规定。事实上，由于笼绞机有退扭装置，在进行绞制时应该会更好（当然产量会低一些），光缆生产大量使用笼绞机就是一个证明。

4.2 电工铝线与电工稀土铝线的性能比较(见表3.4-25)

表3.4-25 电工铝线与电工稀土铝线的性能比较

项　　目	电工铝线	电工稀土铝线	备　　注
1. 抗拉强度（MPa）	机械、电气性能两者相当；稀土铝杆拉线时电阻率的增幅比电工铝杆小		
2. 电导率（%IACS）			
3. 线表面质量	在相同条件下拉线，两者表面质量相当		
4. 热强度损失（%）	两者相当，抗拉强度下降率在2%以下，无明显区别		经70℃和80℃加热，1000h后试验
5. 反复弯曲疲劳性能	条件疲劳极限值两者无明显区别，其波动范围仅在20～40MPa之间		在线材反复弯曲疲劳试验机上进行试验，疲劳循环数10^7次
6. 20℃时的电阻温度系数（℃$^{-1}$）	0.00407（R型软线，铝杆） 0.00403（硬线、半硬线）		在计算电阻率时仍可采用电工铝线的电阻温度系数
7. 低温力学性能	两者都不存在脆性，卷绕试验均无裂纹，抗拉强度均无明显变化		在－38℃下试验
8. 5% HCl溶液喷雾腐蚀试验	电工稀土铝线优于电工铝线		在气溶胶试验箱中进行试验，时间21天
9. 恒定湿热试验	两者结果无明显差别		在DL 302调温调湿箱中进行，40℃±2℃，相对湿度95±3%，7天
10. 盐酸浸渍试验	电工稀土铝线优于电工铝线		5.6%HCl溶液，室温，浸渍3h
11. 氢氧化钠浸渍试验	一般而言，电工稀土铝线比电工铝线好，但与铝中硅、铁、铜杂质，尤其是铁的含量有关，杂质含量特别低的电工铝线会出现相反的结果		10%NaOH溶液，室温，浸渍1、3、5、7h和9h
12. 二氧化硫气体腐蚀试验	两者结果互有高低，主要与铝的纯度有关（一个试验周期24h，第一阶段（40±3)℃、相对湿度100%、8h；第二阶段，18～28℃、相对湿度75%、16h）		在HF－45A化工气体腐蚀箱中进行，0.67%（V/V）二氧化硫气氛，试验周期数4天、10天和19天

4.3 影响铝线退火行为的因素

作导体用的铝线，主要有两种，即：完全退火的软铝线和1/2退火的半软化铝线，它们主要用于电线电缆的线芯和电磁线。掌握影响铝线退火行为的因素，可以用最低的温度、最短的时间获得达到要求性能的退火铝线。

生产半软化铝线的方法，一般有两种，即先拉线达到要求的成品线直径后，实施1/2退火；先拉线，控制余留达到成品线直径的压缩率，然后进行退火，最后将退火线拉到成品线的直径，并获得要求的性能。

以前生产软铝线和半软化铝线的设备，主要是批式退火炉，也即以分批方式加料退火，不能像铜线那样拉线——连续退火，其原因是铝线在连续退火时，在接触轮上打“火花”，致使烧线和断线，但近些年来随着技术的进步，在生产中已实现了铝线的连续退火，这是在技术和装备上的新进展。

退火铝线不仅有电导率、抗拉强度和伸长率的技术要求，还包括切实评估退火铝线的柔软度，即用相应的指标来表征柔软度（性）。普遍认为对退火铝线与退火铜线还有些不同，诸如用抗拉强度、屈伏极限、伸长率、回弹角、螺旋线圈伸长、显微硬度等指标来表征柔软度，似乎不太切实，当然用所谓的“手感”来表征柔软度，就更不科学了。现介绍用低应力伸长（LSE）指标来表征铝线的柔软度，因为塑性与屈伏极限密切相关，对铝线已被证明实用LSE试验可有效地测定再结晶动力学，所以用LSE评估柔软度更为合适。低应力伸长（LSE）试验，在拉力试验机上进行，对照ASTM B279标准（对铜推荐的标准），用一个55.16MPa（8000Psi）的应力施加给试件，历时30s，在退负荷后，测定标距为24.5cm的永久伸长，并记录此值作为LSE值。

据研究和生产实践表明：控制冷加工总量、含铁量和中间退火可明显地影响铝线的低应力伸长（LSE）。图3.4-24示出了含铁量为0.15%的直径3.26mm铝线，在399℃下退火，时间与抗拉强度、屈伏极限、伸长率和LSE变化的关系。图3.4-25为在进一步拉线以前，所有试样在3.26mm

下完全退火，含铁 0.22%、直径 1.63mm、1.02mm 和 0.64mm 铝线在 357℃下的软化曲线。图 3.4-26 为含铁 0.22%和 0.38%铝线，在 3.26mm 下中间退火对而后在 1.02mm 下退火响应（特性曲线）的影响。图 3.4-27 为所有铝线试样含铁 0.22%，并在 399℃下经 30s 退火，先前面积压缩率对最终 LSE 的影响。图 3.4-28 为完全退火的 3.26mm 和 1.02mm 的铝线，随含铁量的增加 LSE 的变化。

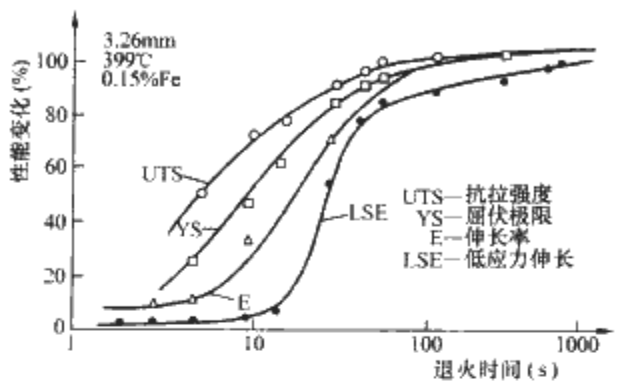


图 3.4-24 铝线退火时间与抗拉强度、屈伏极限、伸长率和 LSE 变化的关系

（在 339℃下退火，铝线直径 3.26mm，含铁 0.15%）

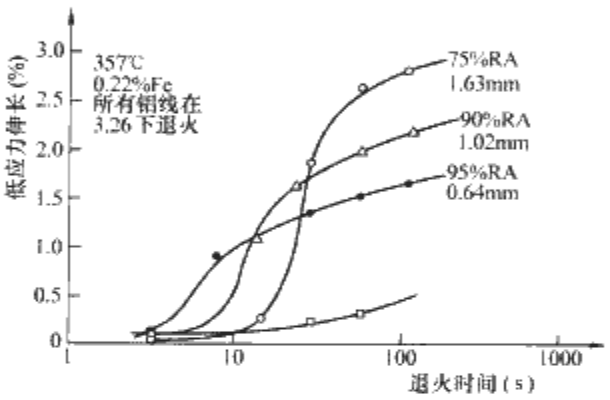


图 3.4-25 铝线在 357℃下的软化曲线

（铝含铁 0.22%，线径 1.63、1.02mm 和 0.64mm，所有试样在进一步拉制以前在 3.26mm 下完全退火。%RA 为面积压缩率）

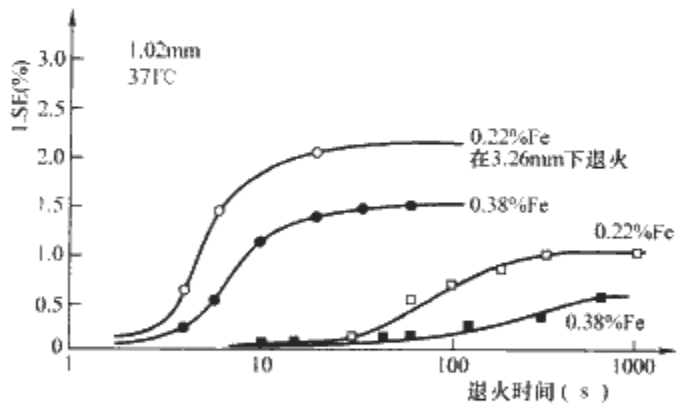


图 3.4-26 铝线中间退火（在 3.26mm 下）对以后退火响应

[含铁 0.22%和 0.38%铝线，在 3.26mm 下中间退火对而后在 1.02mm 下退火响应（特性曲线）的影响]

由上述结果可以看出：在退火以前最终的冷加工总量（面积压缩率）应限制在约 90%，当超过这个数值时，LSE 值将会急剧下降。随着前面冷加工总量的增加，晶粒尺寸减小，由此可说明 LSE 急剧下降的原因。弹性模数的各向异性对线的织构和弹性的影响已被忽视作为一个重要的因素；为了加速再结晶过程和提高完全退火状态线的柔软度（较高的%LSE 值）采用中间退火是一个有效的方法。软化的加速是由于固溶体中杂质析出的缘故；对铝导体中添加少量的铁会大大降低 LSE；完全退火制品的 LSE 值直接与在中间

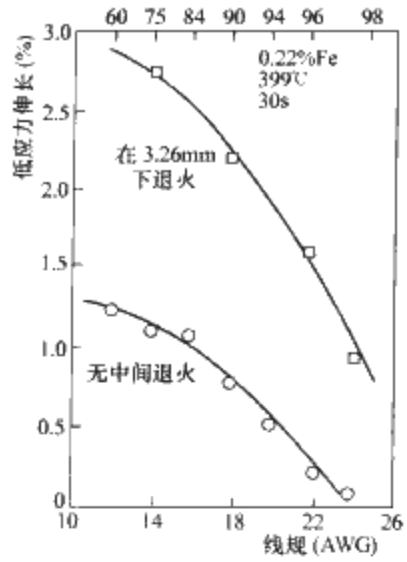


图 3.4-27 铝线先前的面积压缩率对最终 LSE 的影响

（所有试样含铁 0.22%，线在 399℃下退火 30s）

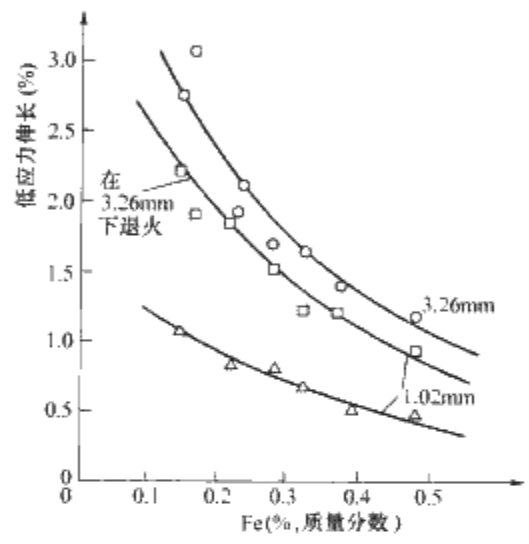


图 3.4-28 铝线含铁量与 LSE 的关系

（完全退火的 3.26mm 和 1.02mm 的线）

尺寸线下的 LSE 值成正比；已经发现：线中再结晶的进展，与用于评估柔软度的力学性能是不同的，抗拉强度响应最快，LSE 值是退火状态最低灵敏度的指标。

4.4 铝拉线装备的新进展

铝和铝合金线的拉线，之所以不能在线连续退火，其原因是在接触轮上打火花烧线。现在随着 0.8～0.12mm 单零铝和铝合金线用量增加，对此种单零线需要进入规模生产，因此铝和铝合金线多头拉线机也迎合了市场的需要。铝和铝合金拉线的多头拉线机和在线连续退火为节约成本、增加效率开创了新的篇章。由大拉、中拉及其相匹配的连续退火装置组成的新装备，其特点在于：

(1) 采用单头或双头出线的无滑动式大拉机和匹配的在线连续退火装置，见图 3.4-29。

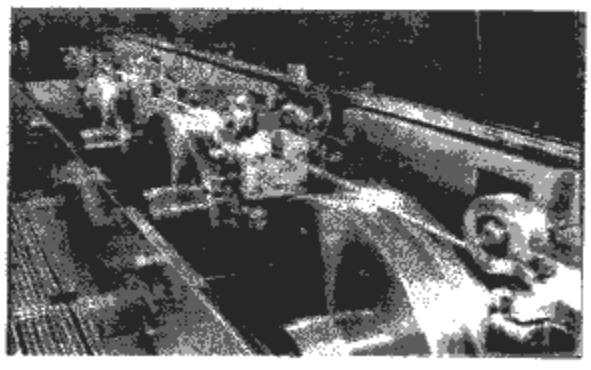


图 3.4-29 铝和铝合金线 MSM85 无滑动单头或双头出线大拉机

（出线直径：1～4.5mm，亦可用于超导线的工业生产）

（2）采用8头拉线机和匹配的在线连续退火装置（见图3.4-30），带有拉线轮喷射装置，可用拉丝油或乳化液润滑，最大进线直径2.6mm，最大运行速度31.5m/s，出线直径0.8～1.5mm，退火速度取决于材料和线径，铝线直径在0.15～0.45mm，速度为25m/s。



图3.4-30 MMH104/RMA201铝和铝合金线多头拉线机/连续电阻退火炉
（最大头数：8头；进线/出线：2.6mm/0.8～1.5mm；最大运行速度：31.5m/s）

（3）在线退火装置，在整个路径上需要密封，充氮气防止线氧化，接触轮有各自的交流马达传动，见图3.4-31。

（4）退火的铝和铝合金线，抗拉强度和伸长率均匀；线光洁无损伤，适于进一步拉线，这点对大拉线坯特别重要。

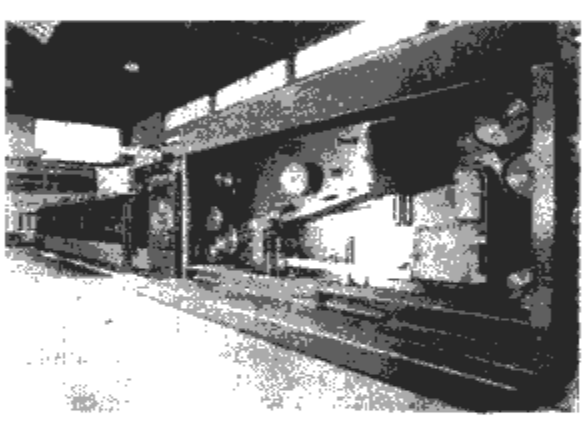


图3.4-31 铝和铝合金线多头拉线机
RA501连续电阻退火装置
（最大设计速度40m/s；R501的改型
R501.3连续电阻退火装置用于铜合金线退火）

4.5 拉铝线的润滑剂及其过滤

拉铝线用的润滑剂，一般有专门生产润滑剂的厂生产，但也有拉线厂自配和自用的，且都自称保密或具有专利权。总的来说，拉铝线用的润滑剂有两类，即矿物油基的润滑剂和水溶性润滑剂（乳化液润滑剂）。矿物油基的润滑剂可用于大、中、小和细拉；乳化液润滑剂一般可用于小拉、细拉，但也有独特地应用于中拉、小拉的。

通常，随着大、中、小、细拉的不同，则矿物油基润滑剂新油的黏度亦不同，见表3.4-26。对不同的大、中、小、细拉，矿物油基润滑剂的应用指南见表3.4-27。

表3.4-26 矿物油基润滑剂的应用和新油的黏度

应　　用	新油黏度
大　拉	750 SSU @ 100°F
中　拉	150 SSU @ 100°F
小　拉	85 SSU @ 100°F
细　拉	42 SSU @ 100°F

表3.4-27 矿物油基润滑剂的应用指南

应　用	细拉（体积）	黏度 SSU@100°F	灰分（%）	潮气（%）	酯（%）
大拉	＜10%	＜2000SSU	＜20	＜0.1	＞15
中拉	＜10%	＜750SSU	＜20	＜0.1	＞10
小拉	＜7%	＜400SSU	＜14	＜0.1	＞5
细拉	＜5%	＜300SSU	＜10	＜0.1	＞5

铝拉线润滑剂的过滤往往不被拉线机制造厂和线材制造厂所重视。从技术上说，拉铝线的矿物油基润滑剂或乳化液润滑剂的过滤要比拉铜线润滑剂困难，这是因为润滑剂中的“铝灰”（俗称）难于和油分离所致。随着拉线的进行铝灰越积越多，润滑剂的黏度也随之增加，由此引起了拉铝线，特别是拉细铝线的表面、断线和成本增高等问题。对润滑剂的过滤有两个目的，即除去金属细粒和除去其他悬浮的固体物质。除去这些物质可降低（与润滑剂）反应的速度，因为这种化学反应会破坏润滑剂，导致恶化成品线的表面。此外，当金属氧化物呈现在润滑剂中时可招致擦伤、模子磨损和断线。对拉铝线润滑剂的过滤，主要的考虑是要除去氧化物的粒子。在所有的铝拉机型式中，润滑剂的过滤不仅可改善线的质量和延长润滑剂的寿命（通过过滤最长的寿命可达7年，一般都在2～5年），而且对过滤设备系统的投入也可容易地因减少润滑剂的消耗和改善拉线生产的效率而得到回报。

拉铝线的矿物油润滑剂和乳化液润滑剂的过滤是很困难的，但只要合适地设计一个过滤系统的留置时间、选择适用的构件和滤清器（Clarifer）的形式是可以获得成功的。

（1）过滤系统的设计。只要有可能，应尽量借重力使润滑剂从拉线机流向过滤系统，而排油管应完全地浸没在油中，并适当地隔开，特别是对矿物油的应用。矿物油润滑剂具有独特的特性，要注意流动的控制以及必须严格地控制避免空气夹带在油中。图3.4-32示出了建议的回流管道，可避免这个问题。如果不可能直接借重力流进过滤系统，那么可使用一个输送贮油槽（见图3.4-33），只要设计合适。

（2）对矿物油过滤系统主要构件的选择。构件选择的成功与否是基于通过有效地除去悬浮的和沉淀的铝固体废物来控制黏度。因为油变脏，黏度迅速增加，黏度的增加大大地抑制了泵、热交换器、滤清器和润滑剂的工艺性能，所以为了获得最高的效率，适当地选择所有的构件是很关键的。

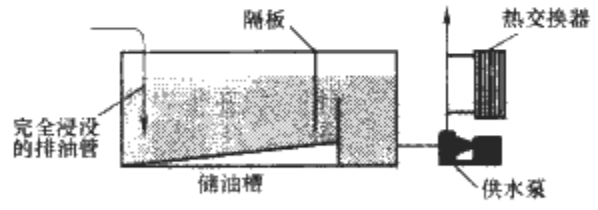


图3.4-32 借重力排入长方形的油槽

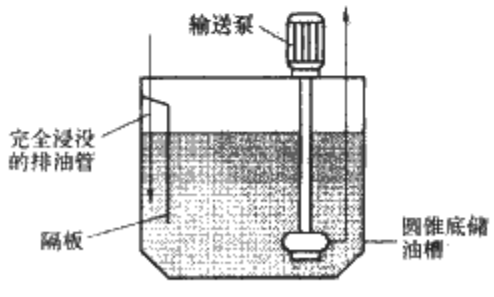


图3.4-33 借重力排入输送贮油槽

1）泵，见图3.4-34。更适于选择的泵是注水空吸泵或立柱泵，自起动注油泵如含有夹带的空气时可能难于起动。

泵应选择最低的实用速度 1150～1750r/min。泵不应考虑在 3500r/min 下运行。在选择泵时应考虑：油的密度、油的黏度@100℉、最大推荐的油黏度（由油制造厂提供）@100℉、工艺的运行温度、最大推荐的悬浮固体的百分数（由油制造厂提供）和对泵要求的压头。

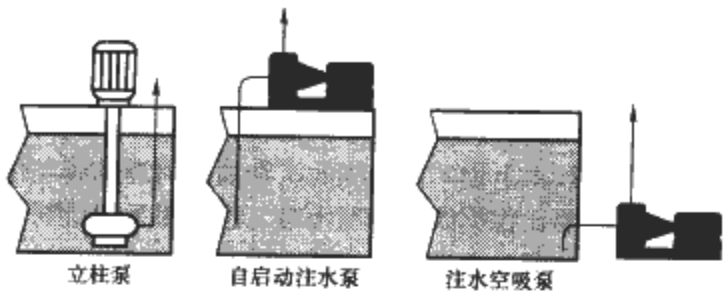


图 3.4-34 泵

2）热交换器。所有拉线机都要求对油进行机械冷却，以满足拉线的需要。典型的要求，其温度在 35～52℃，主要取决于应用。更适于选择的热交换器是板一框架式，如图 3.4-35 所示。其优点在于易于清理、可避免油与冷却水之间的污染和易于增加板（面积区），以便扩大热交换。为了合适地选择热交换器，要像泵那样必须考虑油的黏度，因为油的散热效率比乳化液低。此外，也应考虑密度、比热容、热散逸，要求的运行温度；冷却水的型式、温度、容量和可用的压头。

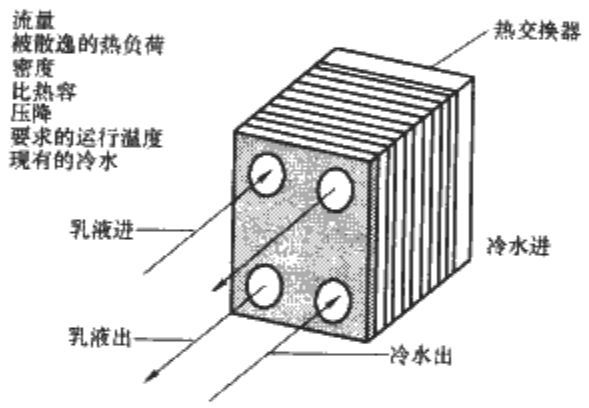


图 3.4-35 热交换器

3）浸入加热器。在起动油润滑系统时，在拉线以前最好先加热油，这将使油更有效地流向模子，有助于润滑。图 3.4-36 的浸入加热器在没有拉线时先保持要求的油温，从而可减少当恢复拉线时的升温时间。加热亦可除去水和潮气，否则将有害于拉线过程，招致加速模子磨损和影响成品线的表面。加热也可增加油释放悬浮固体的能力，以利滤清器有效地把它除去。在任何情况下，必须使用低功率密度的加热器，以延长加热器寿命和避免在集中区强化加热而损坏润滑油。不推荐采用蒸汽加热或热交换器，因为如果发生泄漏将污染润滑油。

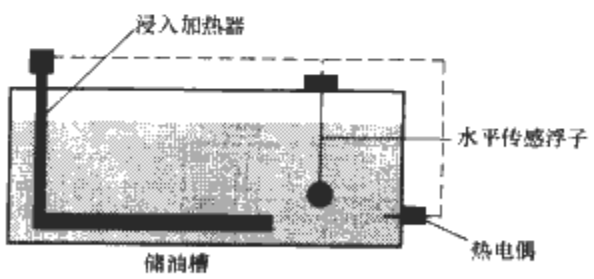


图 3.4-36 加热器

4）密封。当设计任一润滑剂系统时，必须考虑润滑剂与密封系统的相互作用。许多润滑剂含有活性的成分，可腐蚀或膨胀密封，招致危害密封的可靠性，引起泄漏和影响阀门。研究表明 Vilon® 密封对大多数润滑剂都是有相容性的，而且可获得最长的密封寿命。

5）管道。考虑黏度对降低压头和管道埋入是关键的。应用矿物油典型地要求管道的规格比应用乳化油的高 1 号或 2 号（在同样的流量下），速度计算应与乳化油的类似。

（3）过滤设计与留置方法。

1）矿物油。矿物油应认为是一种有价值的润滑剂，因此要使之延长寿命、合适地澄清和维护。为了保证最大地回收投资，合适地维护是重要的因素。合适的过滤已证明可明显地延长油的寿命。系统的维护要求对油经常试验和评估。

2）没有滤清器的留置，如图 3.4-37 所示，需要一个大的储油槽，至少需要 30min 的流量，以有效地使油澄清。这种储油槽将要求定期地把油和积累的固体除去，以维持留置时间，获得可接受的性能。即使油槽中设有隔板以促进沉淀，但仍有脏油送入了拉线机。

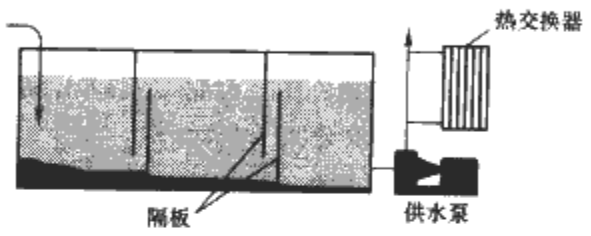


图 3.4-37 没有滤清器的留置油槽

3）设置自清理传送器的留置，如图 3.4-38 所示，这种设计由于使用了自清理传送器，它可自动地除去积累的固体进入垃圾箱或漏斗，所以非常有效。典型的留置时间为 20～30min流量可获得满意的结果。隔板将脏油部分和较清洁的油分开，传送器间歇地运转。

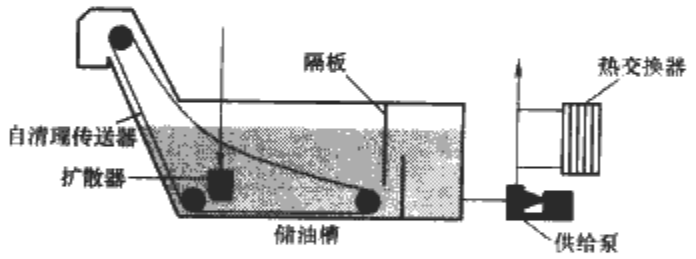


图 3.4-38 自清理传送槽实例

4）设置“加热和保持”的留置如图 3.4-39 所示，使用一个带有两个部分的传送器储油槽，窄一些的部分装有低功率强度的加热器，借此升高油温达到运行温度。温度可降低油的黏度和促进积累的铝颗粒快速沉淀，并用传送器在这部分内把它除去。储油槽大一些的部分装有较大的传送器，以除去留置处理中较大的颗粒。可以看出，这样可延长留置时间，从而有一部分油传送到加热和保持的部分。

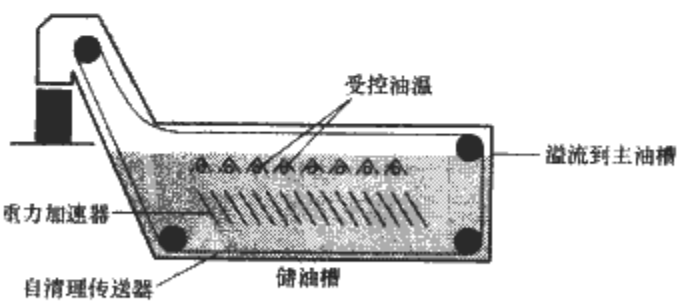


图 3.4-39 设置“加热和保持”的留置（过滤）系统

5）设置介质过滤器的留置如图 3.4-40 所示，它最少需要 15min 的留置，从而把脏的油送到过滤器，进行介质过滤，过滤器通过液位和时间间隔（减少介质消耗）进行控制，并允许经适当的干燥后把废物送走。真空设计的目的是在于将废物送走前，允许进一步实现介质的油取出。过滤器

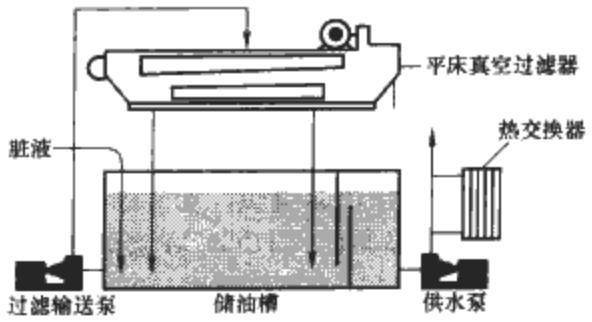


图 3.4-40 具有平床真空过滤器的留置油槽

带有一个真空发生器，以在过滤器介质的另一边产生一个压力降。

6）设置自清理离心机的留置如图 3.4-41 所示，带有自清理传送器的优点如前所述。设计采用离心机（见图 3.4-42）可以说是目前最有效的浓缩和自动地处理相当干的固体废物的一个方法。离心机借离心力聚集悬浮的颗粒（在处理循环时）。然后离心机通过旋转循环，在废物送走以前除去残留的油。先进的离心机，如果在固体积累太多的情况下亦可在起动或在处理循环时直接收集固体废物。这种方法可接受的储油槽留置时间典型地约为 10～15min 流量。

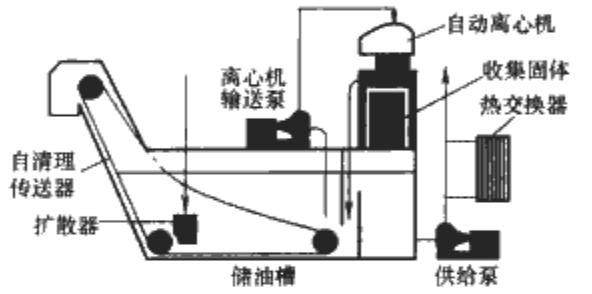


图 3.4-41 具有自动离心机的自清理传送器油槽

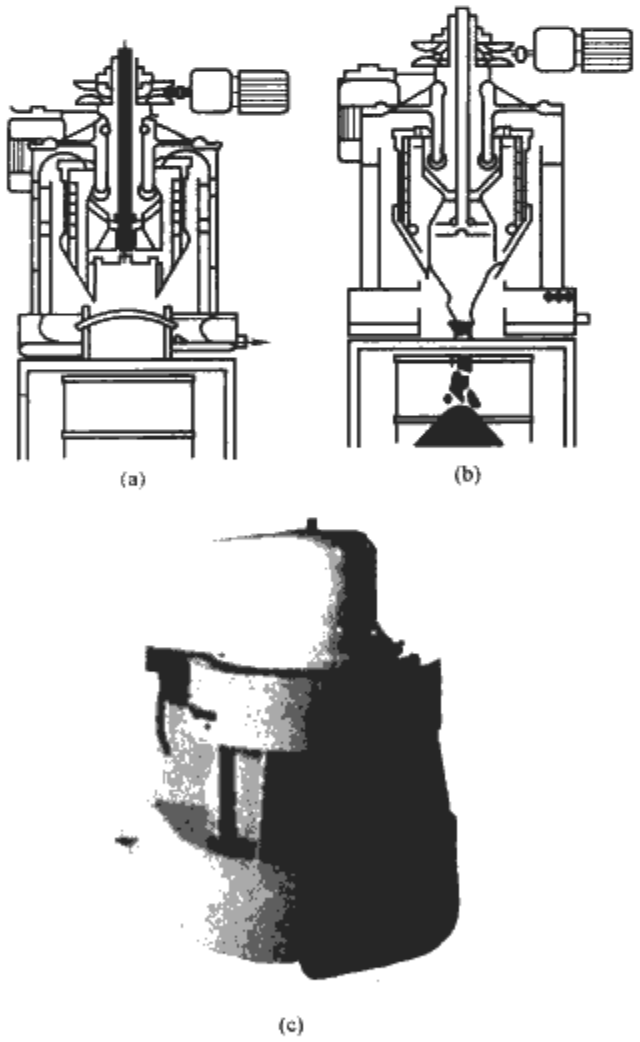


图 3.4-42 自动离心机

（a）处理循环；（b）清理循环；（c）自动自清理离心机

（4）乳化油润滑剂在拉铝线中的应用。乳化油润滑剂在拉铝线中并不普遍应用，这种润滑剂与拉铜线的相类似，具有非常独特的过滤要求。由于在许多应用中矿物油留在线上（在大拉时）——铝氧化物和皂一起——形成了一种非常多脂的油泥，这种残留物难于过滤，所以过滤最好使用介质过滤器或自清理离心机（取决于流量）。离心机可以集中固体物质，并在干的状态下除去。集中的固体物质将在主槽中沉淀，较轻的物质将浮在主槽的表面。积累的和飘浮的物质可用适当的过滤、选择合适的泵和局部采用吸除管把它除去。

两种设置自动离心机和真空过滤器的锥底乳化油槽如图 3.4-43 和图 3.4-44 所示。

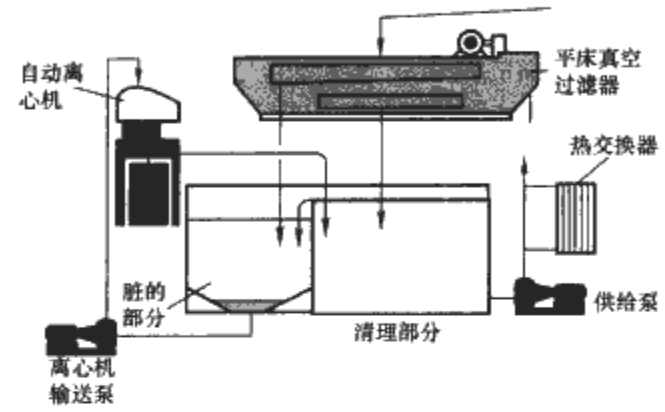


图 3.4-43 具有自动离心机和真空过滤器的锥底乳化油槽

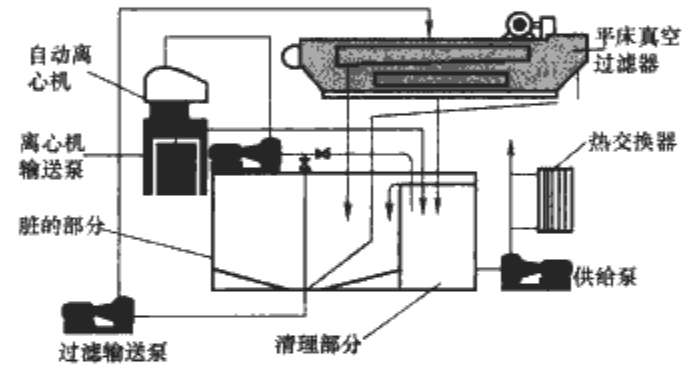


图 3.4-44 具有自动离心机和真空过滤器的锥底乳化油槽

5 细铝线生产

我国早在 20 世纪 60、70 年代就开始了细铝线的研发、制造和应用，但以后没有在电磁线行业获得广泛的应用。现在，由于我国缺铜，铜价又猛涨，且居高难下和波动较大，在以铝节铜的形势下，细铝线生产及其在电磁线中的应用又变得热门起来了。细铝线主要做成漆包线，其标准直径范围为 0.60～0.15mm，但高技术应用的高质量铝线，其直径已达 0.038mm（甚至 0.017～0.10mm）。目前，铝漆包线主要用于微波器高压变压器、电抗器、大容量电动机、微型电动机、电视机显示器、消磁线圈、电脑显示器、照明整流器、厨房电机和汽车用线等场合，目前我国细铝线的市场用量加上外销预计年产量已在 2 万 t 以上（不包括屏蔽用铝镁合金线），且前景尚为看好。

5.1 铝漆包线的生产流程及对细铝线生产的技术要求

（1）铝漆包线的生产流程。直径 2.0mm 或 3.2mm 的铝坯线经中拉、小拉和细拉达到 0.6～0.15mm；然后裸铝线放线经表面清洗、退火、涂漆、烘烤、冷却和收线。

（2）对细铝线生产的技术要求。漆包线用的细铝线，在漆包线中实际上要达到软铝线的技术要求，根据 IEC 317 和 ANSI/NEMA MW 1000 标准对裸铝线的要求是抗拉强度

为 70～90MPa（有的漆包线甚至无抗拉强度的要求，只有伸长率的要求）；伸长率为 10%～15%，电导率≥61.8% IACS（相当电阻率≤0.027 894Ω·mm²/m）。因此，从技术性能要求来看是不高的，但对制造细铝线的工艺要求是很高的。因为拉细铝线易断，且表面不得有细小的毛刺等表面缺陷，所以对制造铝杆的工艺过程及对杆内在的和表面的质量就要求很高；为了保证涂漆质量，在拉线过程中所用润滑剂在铝线表面上的残留膜要彻底脱去，因此对润滑剂的选用或自配不仅要润滑性好，而且要在经过清洗工序时易于脱脂（膜）。因此生产铝漆包线，在细铝线生产上必须突破“断线”、“润滑”和“清洗”三大工艺技术关键。

在喷涂铝、蒸涂铝、电容器、数字技术、半导体技术上用的细的和特细的精铝线（裸线），其工艺技术甚至更高。例如有时需用高纯度精铝；铝杆要经剥皮后再拉线；需要超净环境的拉线条件；对特细铝线的退火必要时需在充有惰性气体的石英管中进行，且要保证抗拉强度和伸长率；对模子尺寸、形状、安装和润滑剂也有很高的要求，但拉线速度不高，一般在 2.5～5m/s。

5.2 细铝线生产的特点

（1）要有高质量的铝杆。拉细铝线用的铝杆，可以用连铸连轧法生产，也可用挤压法生产。铝杆经“康仿”机连续挤压生产的坯线，经中拉和小拉，在小拉时断线明显增加，其原因目前尚不清楚，源头可能要在连续挤压上寻找。在必要时，铝杆或拉一定道次后的坯线可经剥皮后继续拉线。

拉细铝线必须要有高质量的坯线，否则在小拉时就断线频频。对这种铝杆，在制杆过程中必须配料均匀、炉内外精炼除气除渣，炉外用泡沫陶瓷砖对铝液进行连续过滤，此外，在连铸过程中应控制铸条的结晶组织，使之晶粒细化，这样有利于改善杆内在的、表面的质量和机械性能，由此更适于拉制细铝线，但必须指出：铸条晶粒细化的连轧杆和热挤压杆对线的电导率会有所损失，从而应注意使最终线制品的电导率保证符合标准和用户的要求。

图 3.4-45 示出了没有晶粒细化的连铸条和连轧杆的组织。图 3.4-45（a）为柱状晶组织，没有添加晶粒细化剂；粗的柱状晶和柱状孪晶晶团（TCG）在宏观组织中就可清楚地看到。图 3.4-45（b）为来自图 3.4-45（a）中的未晶粒细化的粗晶的微观组织，其中晶粒可大到 12mm×12mm×25mm、同尺寸的 TCG 晶团和直径从 40～1000μm 的混合的不规则晶粒（混合的不规则晶粒放大 100 倍）。图 3.4-45（c）为 9.5mm 杆的微观组织，由粗晶铸条热轧而成，可以看出铸条组织通过连轧，实质上未受触动（放大 8 倍）。图 3.4-46 为细化晶粒的铸条和杆的组织。图 3.4-46（a）为电工铝铸条截面，具有细的等轴晶组织（通过晶粒细化产生的组织），在最初的细的柱状急冷区（约 4.0mm 深）的后面，这种组织就是均匀的等轴晶。图 3.4-46（b）为细晶铸条高倍放大的微观组织，可以看出：等轴晶标称尺寸为 150μm，其变化从20～300μm（放大 100 倍）。图 3.4-46（c）为由细晶铸条轧出的 9.5mm 杆的微观组织，这种轧制组织仍保留着宏观铸条组织取向的痕迹（放大 8 倍）。图 3.4-47 示出了在连轧机中轧制时没有晶粒细化铸条的情景。图 3.4-47（a）为没有晶粒细化的铸条在通过第一机架（压缩率 16%）后出现粗大的“橘子皮”的状况，可以看出：在正常的轧制方向上已形成了裂口。图 3.4-47（b）为在第二机架（压缩率 23%）后，出现了大的晶间裂开，可以看到大尺寸晶粒轮廓。图 3.4-47（c）为第四机架咬入，显示出由于张力和压力的作用致使晶间裂开扩大。图 3.4-47（d）为在第四机架（压缩率 21%）后轧件，可以看出：由于连续轧制缺陷朝着纵轴方向重新取向，个别的晶粒仍然可见。图 3.4-47（e）为在第五机架（压缩率 21%）后，缺陷变成线状，像第五机架

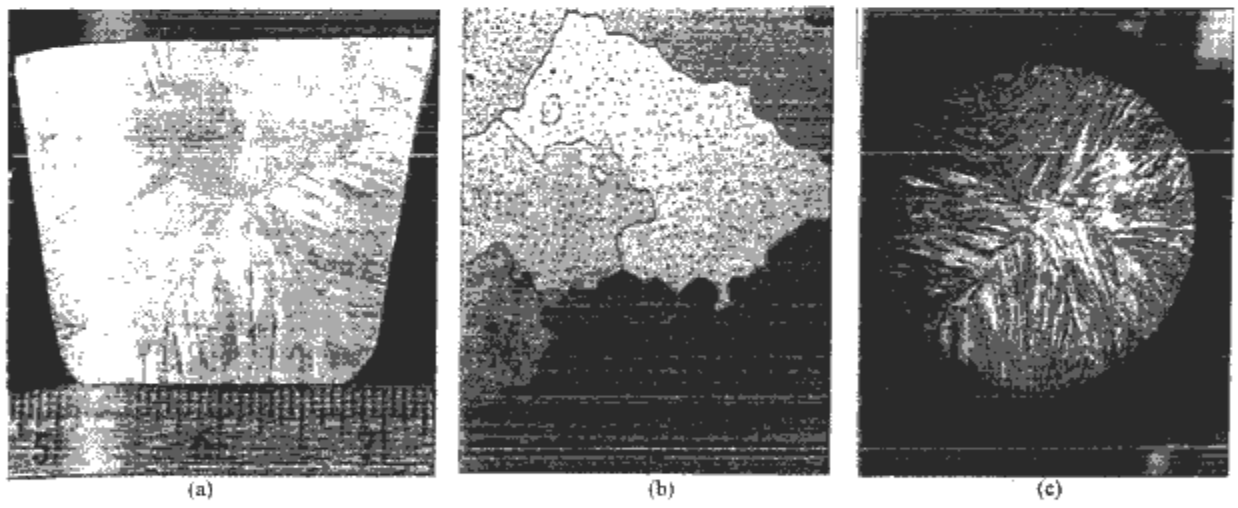


图 3.4-45 没有晶粒细化的连铸条和连轧杆的组织

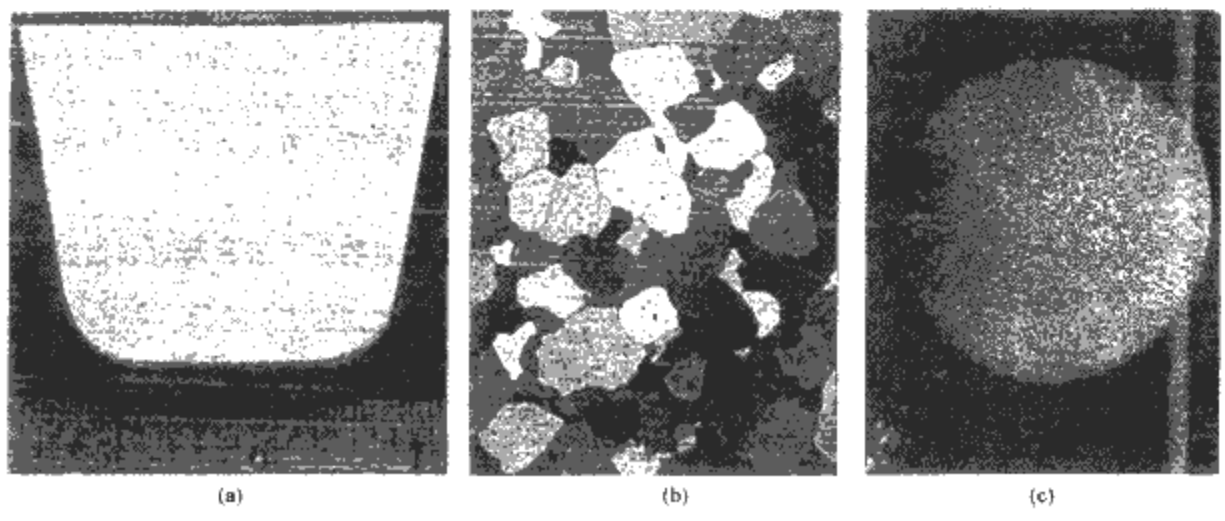


图 3.4-46 细化晶粒的连铸条和连轧杆的组织

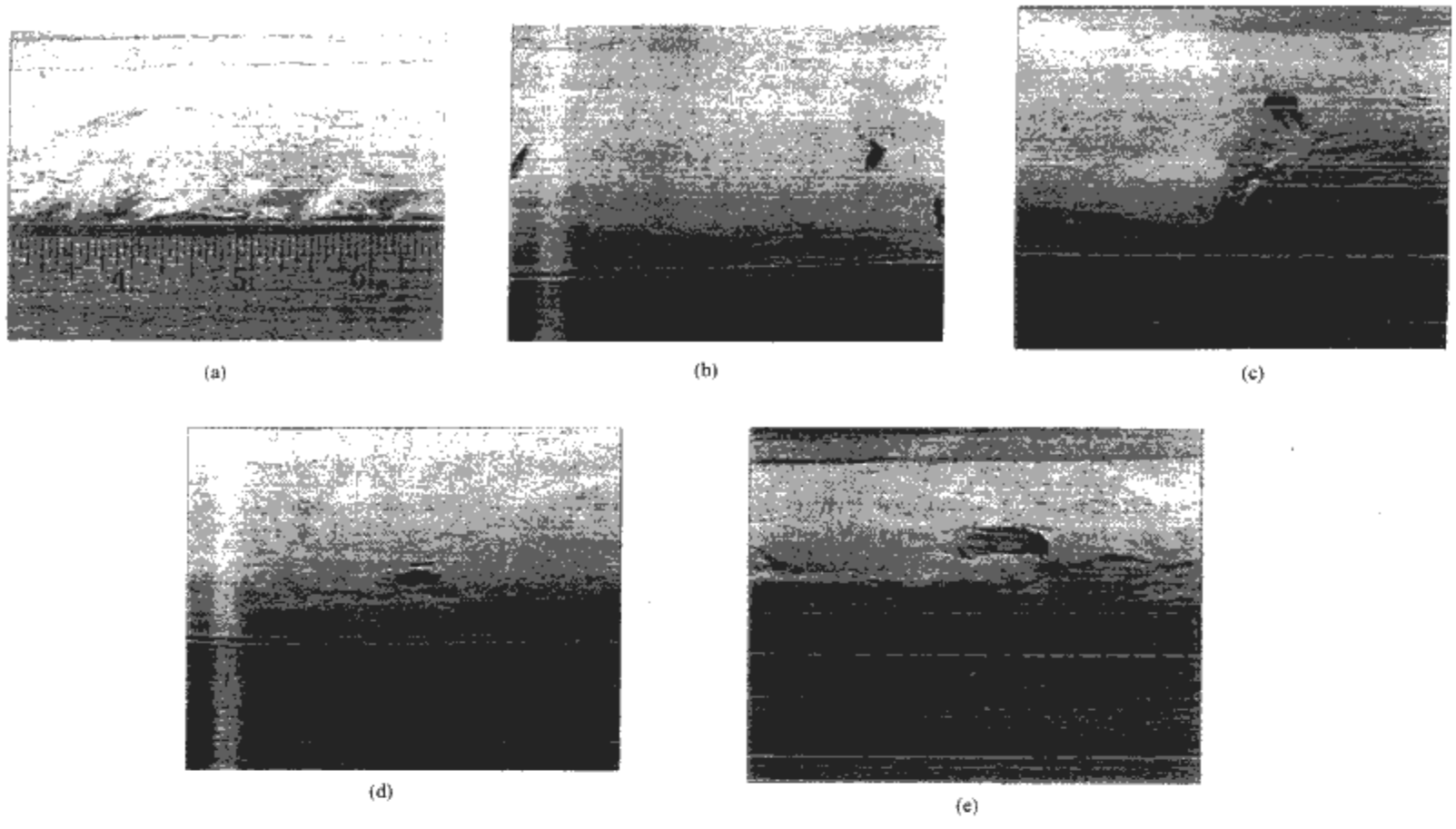


图 3.4-47 在连轧机中轧制时没有晶粒细化铸条的情景

那样的奇数机架，张力处于顶部表面，可以看到晶粒变长。图 3.4-48 示出了在 properzi 连轧机中轧制时细化晶粒铸条的情景。图 3.4-48（a）为在经压缩率为 16%的压缩后，在轧件上呈现出极小的“橘子皮”的状况。图 3.4-48（b）为在第二机架中经 23%压缩后，晶粒细化铸条显示出没有轧制的缺陷和呈现光滑、均匀的表面，这很清楚优于同等的没有晶粒细化的状况。图 3.4-49 示出了由粗晶粒铸条生产的 9.5mm 杆的 10×10 扭转试验的结果。图 3.4-49（a）为显示出大破裂的状况，这种状况与缝或脊无关。图 3.4-49（b）为大破裂起源于 12 点钟的位置（来自扭转试样 c 的宏观腐蚀的杆）。图 3.4-49（c）为扭转试样。图 3.4-50 为由晶粒细化铸条生产的 9.5mm 杆的 10×10 扭转试验结果。图 3.4-50（a）为无规律的（游动的）宏观表面缺陷。图 3.4-50（b)为“缝”，它是高出 1.0～1.5mm 的一条脊，且表明轧制孔型稍有过满充的状况。那么是否影响后续加工和涂漆呢？回答是可能有影响，也可能影响不大，它与图 3.4-49（a）、（b）（放大 3.67 倍）相比影响是极小的。

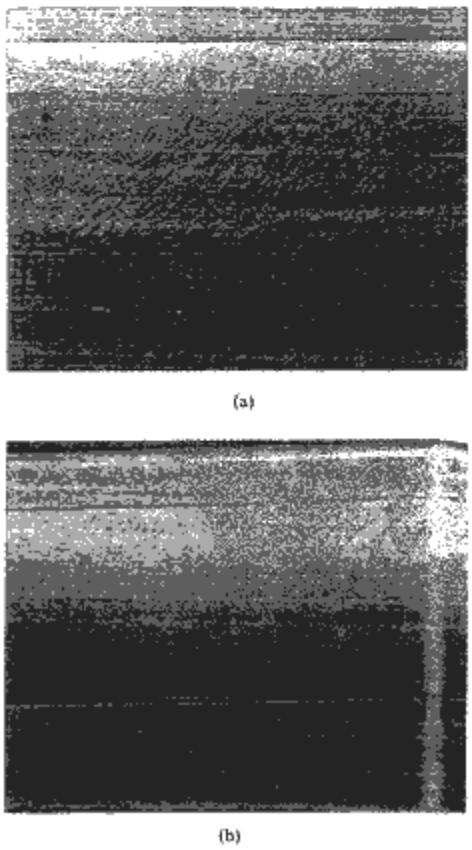


图 3.4-48 在 properzi 连轧机中轧制时细化晶粒铸条的情景

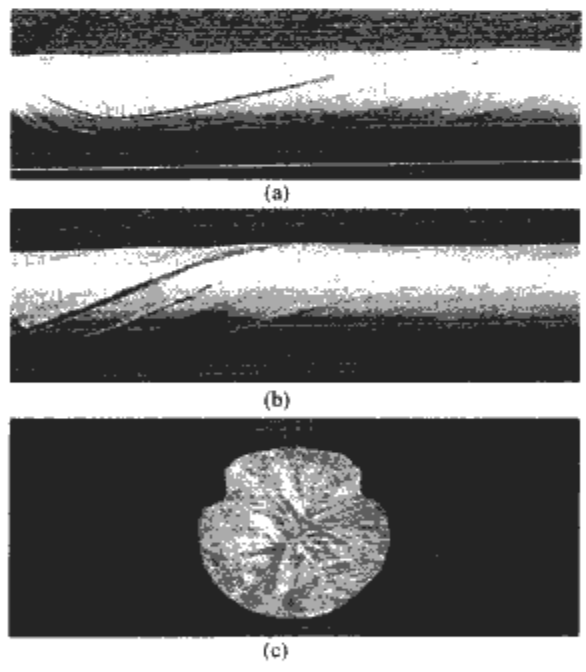


图 3.4-49 粗晶粒铸条生产的 9.5mm 杆的 10×10 扭转试验结果

（2）为保证拉线正常进行，要提高拉线安全系数。因为铝的强度比较低，又要拉细线，实现拉线过程正常进行的条件是：安全系数 $K=\frac{\sigma_b}{\sigma_z}>1$，其中 σ_b 为拉伸后金属的强度极限（MPa），σ_z 为拉伸应力（MPa）。由于铝的强度较低，因而降低了安全系数 K，加之线材本身又很细，在拉线过程中很容易造成断线。为了保证拉线正常进行，要求安全系数 K 选取较高值。同时，为了提高安全系数 K，即降低 σ_z 可以

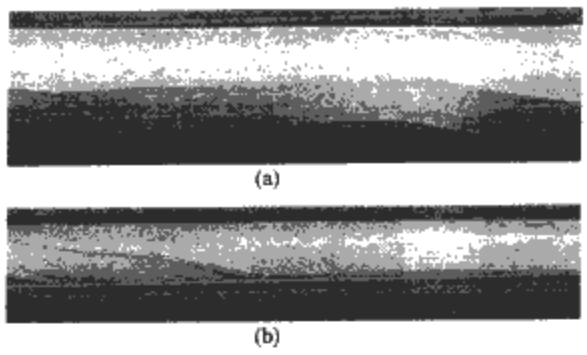


图 3.4-50 由晶粒细化铸条生产的 9.5mm 杆的 10×10 扭转试验结果

通过以下途径：适当降低道次加工率、适当减少模子工作区角度和定径区长度、提高模孔光洁度、提高润滑剂质量和采取过滤措施改善润滑效果等，对直径 0.1mm 细铝线拉线时，推荐仅供参考的工艺参数如表 3.4-28 所示。

表 3.4-28 推荐仅供参考的拉线工艺参数

参数 / 成品线径	安全系数 K	道次延伸系数 μ	道次加工率 ε（%）	模子工作锥半角 α	定径区长占直径的（%）
0.39～0.1mm	1.8～2.7	1.16～1.24	13～20	8～10	20～30

（3）要尽量降低拉线滑动率，润滑剂要控温和过滤。由于铝的硬度低、性软，从而摩擦系数较大，在拉线过程中，线材极易划伤、磨损。又因在拉线中可变因素很多，难于考虑周全，可能会发生张力和“活套”，即使时间较短，对于细铝线是不允许的，因此，目前采用滑动式拉线机，由于滑动的存在，引起拉线中产生较大的摩擦热，线材磨损，产生铝灰污染润滑剂，从而出现铝线强度下降断线、黏模、黏滚筒、线材磨扁、起槽等现象。所以，用滑动式拉线机拉细铝线时，要求滑动率尽量小些。同时要对润滑剂控温（30～50℃）和进行过滤，且加强对润滑剂的管理。

5.3 拉细铝线的滚筒选择

拉线配模指的是在连续式多次拉线机上拉线时，拉线模子数和各个模子孔径的设计计算，合理的配模应该是：充分发挥金属的塑性，使拉伸道次最少，断线次数减少；保证产品符合标准要求；要与现有的设备相适应和使模子、滚筒的磨损尽可能小。

拉细铝线可能用的设备有平滚筒和宝塔滚筒两种，它们都属滑动式拉线机。在滑动式连续拉线机上实现多次拉伸的必要条件是

$$\mu_n > V_n$$

即

$$\mu_n = \tau_n V_n$$

$$\tau_n = \mu_n / V_n$$

延伸系数 $\mu_n = d_{n-1}^2 / d_n^2$

相邻滚筒速比 $V_n = V_n / V_{n-1}$

滑动系数 τ_n

对于平滚筒 V_n 等于 1。对于宝塔滚筒 $V_n > 1$。滑动系数 τ_n 一般都希望尽可能的小，通常取 1.04～1.10。从 $\mu_n > V_n$ 可以看出：由于平滚筒的 $V_n = 1$，所以在平滚筒上 μ_n 大于 V_n 的必要条件很容易满足，即只要 $\mu_n > 1$ 即可。而在宝塔轮滚筒上 V_n 本身是大于 1 的，即 μ_n 不仅要大于 1，还要大于 V_n。这就是为什么在平滚筒上实现拉伸比在宝塔轮上容易的原因。从 $\mu_n = \tau_n \cdot V_n$ 可以看出：由于平滚筒的 V_n 等于 1，而 τ_n 又希望尽可能小，这样 μ_n（等于 $\tau_n \cdot V_n$）的值就小；而宝塔轮滚筒的 V_n 是大于 1 的，则 μ_n（等于 $\tau_n \cdot V_n$）的值显然较大。这就说明了在滑动相同（τ_n 相同）的情况下，用平滚筒拉伸所需的模子数要比宝塔滚筒拉伸的模子数多得多。反之，在模子数相同的情况下（即 μ_n 一样），由于平滚筒的 V_n 小于宝塔滚筒的 V_n，从 $\tau_n = \mu_n / V_n$ 可以看出：平滚筒的 τ_n 比宝塔滚筒的 τ_n 大得多，即用平滚筒拉线滑动比宝塔滚筒大得多。因此，从拉伸道次、发挥金属塑性、减少滑动等各方面比较，在用滑动式拉线机拉细铝线时，宝塔滚筒比平滚筒好，实验结果还表明：在拉细铝线时，并非加工率取得越小越好拉，如果配模与设备相适应得当，加之润滑条件和材料等条件均较好的配合，完全可以采用较大的加工率，例如 0.3mm 的铝线（进线）用 13 个模子可拉到 0.1mm。同样，用 11 个模子也能拉得出。

5.4 拉细铝线的润滑及过滤系统

拉细铝线的润滑，如第 3 篇第 4 章 4.5 节（拉铝线的润滑剂及其过滤）所述。但用于拉制漆包线用的细铝线，其对润滑剂的要求不仅要润滑性好，而且附着于铝线上的油膜要易于除去。为此，例如好富顿（Houghton）油品公司推出了 CINDOL 系列润滑剂，其主要性能除能满足拉线所需的润滑、冷却的基本要求外，针对铝的化学特性，添加 ND 独特的添加剂，还可防止拉制过程中铝的氧化，从而降低摩擦、提高冷却效率；又如无锡巨丰复合线有限公司自主开发了含有独特添加剂的润滑剂，这种润滑剂不仅可降低摩擦系数，而且其对铝粉及油污有较强的清洗功能，使拉出的线表面较为洁净。为了进一步提高表面洁净度，除去残留的油污和铝粉，配套开发了为漆包铝线专用的高效清洗装置和几乎是中性的清洗液，保证了洁净的铝线表面，解决了由于油污、铝粉清洗不彻底而引发的漆包线表面珠粒、露铝、漆层脱落等问题。

除在架空导线上应用较粗的铝线外，随着铝线在中压、高压电缆、细铝漆包线和屏蔽线等电线电缆产品中的扩大应用，而且这些铝线的直径一般都在 0.5mm 及以下，最小可达 0.12mm。因此对铝拉线润滑剂及其过滤系统的改进已显得更加迫切。德国 Carl Bechem 公司与 Reber Systematic（RESY）和 TWE Dierdorf 公司合作，把各自的技术优势组合起来，研究开发了新的铝拉线润滑剂及其过滤系统，从而在这方面获得了新的进展。图 3.4-51 为 Carl Bechem 公司新的纸过滤系统。可延长该公司新的 KUBITRAC 铝拉线润滑剂的使用寿命。

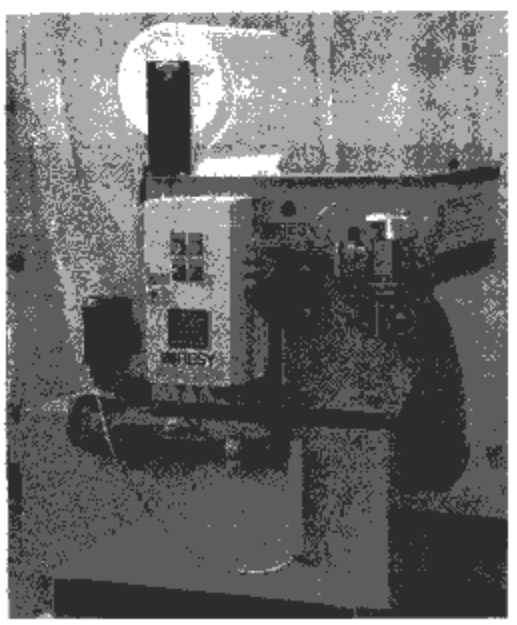


图 3.4-51 德国 Carl Beachem 公司的纸过滤系统

KUBITRAC铝拉线润滑剂系列产品是在识别了铝拉线润滑过程机制的基础上开发出来的。该产品由高度精制的基础油、合成润滑添加剂和专用的去氧化剂组成。这种新润滑剂的润滑性能明显优于普通铝润滑剂的润滑性能，其黏度在40℃下降到约40～60mm²/s。由此，该润滑剂呈现出更均一的润滑性能。此外，合成添加剂可使润滑剂产生尽可能小的氧化倾向，并和专用的去氧化剂相结合，保证润滑剂的黏度不会增加。

过滤系统：为了进一步增加“KUBITRAC”铝拉线润滑剂的使用寿命，开发了新的过滤系统。其特点：投资低，润滑剂完全流动过滤，可过滤的微粒小到5μm，可增加铝拉线润滑剂的使用寿命，维护成本低、简化维护要求。

新的专用过滤纸：以使用KUBITRAC-8铝拉线润滑剂为例，采用此种过滤纸有良好的经济利益。该种过滤纸是一种三维的过滤纸，是专门为中等和高黏度精制润滑剂设计的。此种专用的纤维板呈现出非常高的流动速率，可保证具有完全过滤的功能，其特点有：铝拉线润滑剂的寿命可增长4.5倍；KUBITRAC-8铝拉线润滑剂可保持稳定的状态，明显减少对更换润滑剂的要求；在铝拉线润滑剂中细屑的含量是非常低而稳定的，从观察润滑剂槽底，没有沉积就可得到证明；拉出的铝线表面非常清洁，不需另加清洗表面的工序，这对生产铝漆包线用的细铝线更有意义；除了更换纸以外，没有其他的维护工作要做；过滤纸的消耗是很低的，并且过滤纸拉出来是干的；过滤系统不需昂贵的泵，只需使用标准泵就可。

采用乳化液润滑剂拉制细铝线，我国也做过一些研究和试验。由于铝为两性金属，既能与酸反应，又能与碱反应，所以用肥皂配置的润滑液，最好为中性或弱碱性。试验认为下列两种润滑剂可获得较好的效果：上海牌檀香皂1.5%～3%，余为水；上海工业皂片1.5%～3%，余为水。

5.5 细铝线拉线机

国外拉细铝线用拉线机早有系列产品，近些年又开发了铝及铝合金线中拉机的连续退火装置（见第3篇第4章4.4节）。现以NIEHOFF公司的M315和H20铝线中拉机和小拉机为例介绍如下：

(1) M315铝中拉机主要技术参数。

成品线径范围：最小0.6mm，最大3.0mm（抗拉强度为200MPa）。

最大进线直径：4.00mm（抗拉强度为80MPa，退火线）。

最多模子数：17个。

每道次平均压缩率：21%。

退火装置：不带。

成品线直径和线速：

直径（mm）	线速（m/s）
1	31.5
1.2	20.0
1.5	15.0
2.0	8.0
3.0	4.0

主传动直流电机功率：120kW。

(2) H20铝小拉机主要技术参数。

成品线径范围：最小0.2mm，最大0.5mm。

最大进线直径：2.00mm（抗拉强度为80MPa，退火线）。

最多模子数：21个。

每道次平均压缩率：19%。

退火装置：不带。

成品线直径和线速：

直径(mm)	线速(m/s)
0.20～0.40	30.0
0.5	20.0

拉线宝塔轮：5级；材质：氧化锆陶瓷。

主传动直流电机功率：45kW。

6 电工铝线的应用

电工铝导体是电工行业的基础材料之一，它的制品形式主要包括圆线、型线和绞线三种，分别用于架空导线、电线电缆线芯、电磁线、变电站内部用导线和双金属线等场合。

电工铝线（硬线）在架空输配电线路上的应用数量最多，制品的品种也最多，并可在各电压等级的线路上使用。

6.1 长江三峡送电工程±500kV主干线路用大截面钢芯铝绞线（ACSR—720/50）

详见表3.4-29～表3.4-31。

表3.4-29 ±500kV直流输电线路用ACSR—720/50钢芯铝绞线性能

项目		设计	检测要求		实测值
			按IEC 61089考核	工程实际考核值	
型号		ACSR—720/50		ACSR—720/50	ACSR—720/50
结构 根数/直径（mm）		铝 45/4.53 钢 7/3.02	45/4.53±1% 7/3.02±0.05	45/4.53±1% 7/3.02±0.05	45/4.523 7/3.028
计算截面积（mm²）	铝	725	725	725	723
	钢	50.1	50.1	50.1	50.4
	总	775	775±2.0%	775±2.0%	773.4
铝钢比		14	14	14	14
外径（mm）		36.2	36.2±1%	36.2±1%	36.24
计算质量（kg/km）		2397.7	2397.7±2%	2397.7±2%	2392.8

续表

项目		设计	检测要求		实测值
			按 IEC 61089 考核	工程实际考核值	
总拉断力（保证值）（kN）		170.6	≥171.2	≥170.6	182.1
拉力重量比（km）		7.26		7.26	7.76
弹性系数×10^3（MPa）①		63.7		63.7±3	63.9
20℃直流电阻（Ω/km）		0.039 84		≤0.039 84	0.039 23
线膨胀系数×10^{-6}（1/℃）①		20.8		20.8	21.7
振动疲劳		振动角：30′ 振动频率：40±10Hz 导线张力：25%RTS（即 42.65kN） 有效长度：≥40m（实际 56m） 振动次数：3×10^7 次			3 根试样，导线不断股
10 年蠕变量①（mm/km）	15%RTS				253.5
	25%RTS				462.5
	35%RTS				757.8
载流量①（A）	Ⅰ 20℃→70℃，90℃	环境条件：	Ⅰ（国内常用）	Ⅱ（IEC 61597—1995）	1284；1535
	Ⅰ 40℃→70℃，90℃	风速：	0.5m/s	1.0m/s	858；1240
	Ⅱ 20℃→70℃，90℃	日照强度：	1000W/m^2	900W/m^2	1567；1240
	Ⅱ 40℃→70℃，90℃	导体表面吸收系数：	0.9	0.5	1152；1476
		导体辐射系数：	0.9	0.6	
		环境温度：	20，40℃	20，40℃	
		导体工作温度：	70，90℃	70，90℃	

① 工程需要实测参考值。

表 3.4-30　　ACSR—720/50 用铝线（硬线）的性能

项目	设计	检测要求		实测值
		按 IEC 60889—1987	工程实际考核值	
外径（mm）	4.53	4.53±1%	4.53±1%	4.523
截面积（mm^2）	16.12	12.12±2%	16.12±2%	16.07
单质量（g/m）	43.56	43.56	43.56	43.42
抗拉强度（MPa）	160	≥160（任一单线的最小值）	≥165（一批平均值） ≥165（任一单线的最小值）	175.3（45 根平均值） 165.3（任一单线最小值）
20℃电阻率（Ω·mm^2/m）	0.028 264	≤0.028 264	≤0.028 264	0.027 97
卷绕性能	1d 绕 8 圈，退 6 圈，再绕 6 圈，不断不裂			符合
接头抗拉强度（MPa）	冷压焊 130	冷压焊≥130		161.3

表 3.4-31　　ACSR—720/50 用镀锌钢线的性能

项目	设计	检测要求		实测值
		按 IEC 60889—1987	工程实际考核值	
外　径（mm）	3.02	3.02±0.05	3.02±0.05	3.028
截面积（mm^2）	7.16	7.16±0.24	7.16±0.24	7.20
单质量（g/m）	55.73	55.73	55.73	56.07
抗拉强度（MPa）	1410	≥1410	≥1410	1517
1%伸长应力（MPa）	1240	≥1240	≥1280	1316.8
伸长率（%）（标距 250mm）	3.0	≥3.0	≥3.0	5.5
扭转（100D）	14	≥14	≥14	25
1D 缠绕	不断裂	不断裂	不断裂	符合
镀层质量（g/m^2）	245	≥245	≥245	286.8
2D 缠绕	镀层不开裂或起皮			符　合
镀层均匀性	用肉眼观察镀层应没有孔隙，镀层光滑，厚度均匀			符　合

6.2　架空线路用扩径导线

（1）330kV 线路用扩径架空导线。我国第一条 330kV 超高压刘天关架空线路，跨越甘陕两省全长 534km，送电容量 400MW，导线截面选用 2×300mm^2 最为经济，采用间距为 400mm 的双分裂导线，海拔在 2000m 以上者采用 K272—2 型扩径架空导线。全线架设两根地线作为防雷保护并兼作维护和调度通信之用，利用架空地线开三路以上高频通道，采用具有较好导电性能的 4×3.8/0.4 加 3×3.8 型铝包钢线与镀锌钢线的混绞线。

采用 K272—2 型扩径架空导线的 330kV 超高压架空线路自 1972 年投入运行至今，未发生问题，证明性能良好，

满足了刘天关线路的运行要求。K272—2型扩径导线的研制成功，不仅解决了200～2500m高海拔地区的电晕问题。制造K272—2型导线只需在现有生产条件下稍加措施就可大量生产。随着扩径架空导线的系列化生产，为解决2000～4000m高海拔地区330kV以上架空线路的电晕问题，将大量使用扩径架空导线。

K272—2型架空导线的结构和主要性能，见表3.4-32和表3.4-33。

(2) 750kV线路用扩径架空导线。我国目前最高电压等级的输变电工程——西北750kV输变电示范工程于2005年9月26日正式投入运行，是我国电力工业发展史上一个新的里程碑。该试验线路由青海官亭至甘肃兰州东，总长140km，有两座750kV变电站（主变压器容量均为1×1500MVA）。该输电系统平均海拔在2000m以上，线路采用6分裂扩径导线（表3.4-34～表3.4-36），线路使用扩径导线共23km，约500t。一条750kV线路的输电能力是330kV线路的4倍，在送电过程中线损还会明显降低，同时线路走廊占地面积也较330kV线路减少许多。根据我国电网发展规划，西北750kV输变电示范工程建成后，还将建设青海官亭到西宁、甘肃兰州东到宁夏银川东、新疆哈密到甘肃永登等工程。

表3.4-32　　K272—2型扩径架空导线结构

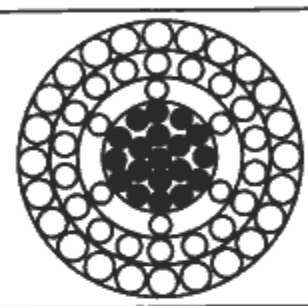
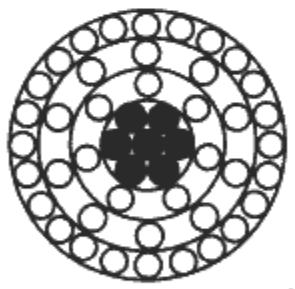
铝股线：24×3.04mm（外层） 18×2.59mm（内层） 6×2.59mm（支撑层） 钢股线：19×2.2mm 铝截面积：300.8mm² 钢截面积：72.2mm² 铝钢比：4.17 质量：1409kg/km	K272—2型扩径导线截面积300.8mm²，与普通型LGJ—300钢芯铝绞线的截面相当，而直径扩大到27.44mm与轻型LGJQ—400钢芯铝绞线的直径相当，综合拉断力达到142 850N又与加强型LGJJ—300钢芯铝绞线的综合拉断力140 890N相当	

表3.4-33　　K272—2型扩径架空导线主要性能

1. 综合拉断力：14 285kg 2. 最终弹性模数：8693kg/mm² 3. 永久变形伸长率：0.1413% 4. 初伸长补偿 设计：收紧弧垂14% 5. 设计安全系数：2.67	6. 设计最大使用应力：116MPa 7. 设计破坏应力：310MPa 8. 线膨胀系数：13.18×10⁻⁶℃⁻¹ 9. 1000h蠕变率（30℃，25%拉断力）：0.0190% 10. 耐振动性能（振动角10′，张力25%综合拉断力，振动2×10⁷次）未产生断股

表3.4-34　　750kV线路用扩径架空导线技术条件

项目		设计技术条件	
型号		LGJK—300/50	
结构：根数/直径（mm）		Al：(24+10+7/3.07) St：7/3.07±0.05	
计算截面积（mm²）	铝	303.4	
	钢	51.8	
	总	355.2±2.0%	
铝钢比		5.86	
外径（mm）		27.63±1%	
计算质量（kg/km）		1243.9±2%	
总拉断力（保证值）（kN）		≥115.0	
拉力重量比		≥9.0	
弹性系数×10³（MPa）		76.8±3.0	
线膨胀系数×10⁻⁶（℃⁻¹）		18.7	
20℃直流电阻（Ω/km）		≤0.095 33	
外层绞向		右向	
计算载流量（A）	35～70℃	590	
	40～70℃	520	
接头	铝线接头间距（m）	≥15	
	铝线接头数量	每根制造长度导线不多于4处，最外层铝线不允许接头	
	镀锌钢线	不允许接头	
外表面质量		表面光洁，无毛刺、起皮及油污	
交货长度（以实际供货合同为准）（m）		每盘装1根导线，线长2500m+1%，允许有占总量5%数量的短段交货，但短段也不得短于1250m	



LGJK—300/50扩径导线结构

外层铝线：24×3.07—1%
邻外层铝线：10×3.07+1%
内层铝线：7×3.07+1%
钢　　芯：7×3.07±0.05

表 3.4-35 铝线技术条件

项 目	设计技术条件
外径 (mm)	3.07±2%
截面积 (mm^2)	7.40±4%
单位质量 (g/m)	20.00
抗拉强度 (MPa)	≥175（一批平均值） ≥170（任一单线最小值）
电阻率 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	≤0.028 264
接头抗拉强度 (MPa)	冷压焊≥150
卷绕性能	1d 绕 8 圈，退 6 圈，再绕 6 圈，不断不裂
表面质量	圆整光洁，无毛刺、划伤、油污

注 只有支承层铝线才允许有冷压焊接头，最外层铝线不允许接头。铝线接头考核：采用实际应用的冷压焊机与模具，连续焊 5 个接头，其抗拉强度保存率应为：$n \geq 90\%$。

表 3.4-36 镀锌钢线技术条件

项 目	设计技术条件
线径 (mm)	3.07±0.05
截面积 (mm^2)	7.40±0.24
单位质量 (g/m)	57.57
抗拉强度 (MPa)	≥1410
1%伸长应力 (MPa)	≥1280
伸长率（标距 250mm）(%)	≥3.0
扭转次数（100D）	≥14
自身卷绕	紧密绕 8 圈，不断裂
镀锌层质量 (g/m^2)	≥245
镀锌层附着性（2D）	紧密绕 8 圈，镀层不开裂或起皮脱落
镀锌层连续性	用肉眼观察镀层应没有孔隙，镀层光滑，厚度均匀

（3）1000kV 级特高压交流和±800kV 级直流架空输电线路正在建设和筹建。我国电网正在建设和筹建特高压架空输电线路。从晋东南经南阳到荆门的特高压交流试验示范工程已在 2006 年 8 月 19 日奠基，该线路总长 653.8km，系统额定电压 1000kV，最高运行电压 1100kV，自然输送功率 500 万 kW。此外，国务院已于 2005 年 12 月 22 日在批准国家发改委关于核准金沙江、溪洛渡水电站项目的请示中明确，该两电站初定采用 3 回±800kV640 万 kW 的直流输电方案。特高电压输电工程用的设备主要立足国内，其中与导线有关的多分裂导线的架空线路，将可能选用诸如常规导线（如 8 分裂导线，单根导线截面积可能在 400～500mm^2）、扩径导线、大跨越导线和低噪声等导线。

6.3 变电站用扩径导线

（1）330kV 变电站用扩径导线。西北刘天关 330kV 输变电工程地处高海拔，且电压又高，为此我国首次研制了 330kV 变电站用的扩径导线（也称软母线）。

KKZ51—3 型扩径导线主要技术要求：外径：50～60mm；载流量（70℃）：700～1000A；拉断力：不少于 98kN。

扩径导线的结构及主要技术性能：为了减小电晕损耗和对无线电干扰的影响，选择了扩径型式最好的空心型式，形成空心的支撑物是金属软管或弹簧管。通过试制、性能测试和鉴定，最终选定了 KKZ51—3（软管）型扩径导线，其结构尺寸和主要技术性能如表 3.4-37 所示。

使用情况：KKZ51—3 型扩径导线在刘家峡水电站、秦安变电站、汤峪变电站的 330kV 配电装置中采用。自 1972 年投入运行以来，实践证明性能良好。后又陆续在韩城火电厂、铜川变电站、兴平变电站应用。

（2）500kV 变电站用扩径导线。500kV 变电站用扩径导线的主要技术要求和结构及计算参数如表 3.4-38、表 3.4-39 和图 3.4-52 所示。这些导线都已在 500kV 变电站中获得推广应用，尤其是 LGJQT—1400 型导线。

表 3.4-37 KKZ51—3 型扩径导线的结构和性能

结 构		性 能	
金属软管外径	39mm	断股伸长	1.1%
铝 线	83/3.0mm	弹性模数	
钢 线	7/3.0mm	起始	69 400MPa
外 径	51mm	最终	73 000MPa
		线胀系数	$19.9\times10^{-6}℃^{-1}$
		载流量	
		70℃时	800A
		90℃时	1040A
		计算电阻	0.051Ω/km
		单位质量	2.67kg/m
		起始电晕电压（δ=0.815 时）	中相 246kV 有效 边相 256kV 有效

表 3.4-38 主要技术要求

项 目	标称截面积 (mm^2)	
	900	1400
最小外径（mm）	48.5	43.5
最小拉断力（kN）	196	245
载流量（A）	1000	1250

表 3.4-39 结构及其计算参数

结 构	铝钢扩径空心绞线	特种轻型钢芯铝绞线
	LGKK—900 型	LGJQT—1400 型
支撑软管直径（mm）	27.0	—
钢芯	—	19/3.0
第 1 层：铝	18/3.0	13/4.5
钢	12/3.0	—
第 2 层铝	28/4.0	19/4.5
第 3 层铝	34/4.0	25/4.5
第 4 层铝	—	31/4.5
铝截面积 (mm^2)	906.4	1399.6
钢截面积 (mm^2)	84.83	134.3
铝钢截面积比	10.68	10.42
外径（mm）	49.0	51.0
拉断力（kN）	204.82	329.28
直流电阻（Ω/km）20℃	0.033 17	0.021 38
单位质量（kg/km）	3620	4962
载流量（A）	1020	1260

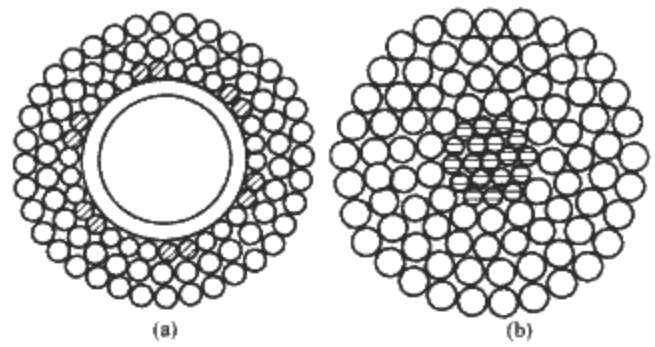


图 3.4-52 500kV 变电站用扩径导线
(a) LGKK—900 型扩径导线（金属软管支撑）；
(b) LGJQT—1400 型特轻型钢芯铝绞线

6.4 型线同心绞架空导线

型线同心绞架空导线的结构如图 3.4-53 和图 3.4-54 所示。这种结构的主要特点是：导线的填充系数比较高，这样可得到等直径载流量大、等截面直径小，可减少风压的效果。同样的道理，这种结构亦可用于磁悬浮长定子电缆和全塑绝缘实芯电力电缆的线芯。

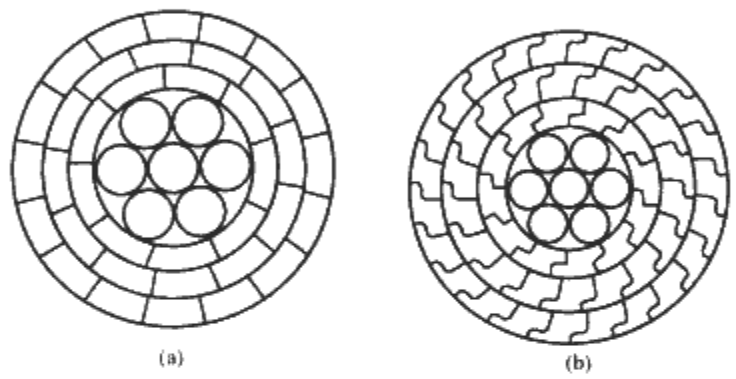


图 3.4-53 由成型单线组成的三层导线
(a) JLxX/Gyz 或 JLxX/Ly 型由成型单线组成的三层导线；
(b) JLxX/Gyz 或 JLxX/Ly 型由成型单线组成的三层导线

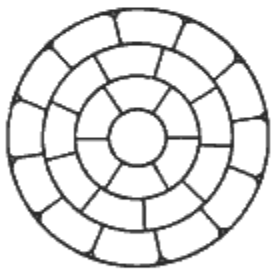


图 3.4-54 JLxX/LyX 型由成型单线组成的两层导线

型线同心绞架空导线的国家标准已经公布（GB/T 20141—2006），它等同采用 IEC 62219：2002 年标准。型线同心绞架空导线由下列任一绞前、绞时或绞后成型的金属单线组合而成：LY9 硬铝线；LY9X 绞前成型的硬铝线（符合 GB/T 17048 中等效硬铝线直径）；LHA2 或 LHAI 硬铝合金线；LHA2X 或 LHA1X 绞前成型的硬铝合金线（符合 JB/T 8134 中等效硬铝合金线直径）；G1A 或 G1B 普通强度钢线，A、B 代表镀锌层级别，分别对应 1 级和 2 级；G2A 或 G2B 高强度钢线；G3A 特高强度钢线；LB 铝包钢线。

绞合前所有的单线均应具有 JB/T 8134、GB/T 3428、GB/T 17048、GB/T 1739 等标准规定的性能。绞合前成型的单线应具有基于它们的等效单线直径所计算的性能。

在新国标中规定，对这种导线认为三种生产工艺，即单线在一个工艺过程中被成型，绞合是在另一工艺过程中进行；单线成型和单线绞合在一次操作中完成；先绞合一层圆单线，然后将此层紧压成圆形截面。圆形单线的其他层可被绞合和紧压或成型单线的其他层可被绞合在紧压的芯线上。

对这种导线的标示系统用于表示由成型铝线、有钢线或无钢线制造的绞线。

（1）单一铝导线用 JlxX 表示，x 表示铝的牌号。

（2）组合铝导线［注：在新标准中已将“复合导线”改称为“组合导线”（由两种及以上金属材料或金属与非金属材料绞合而成的导线）］用 JLxX/Ly 或 JLxX/LyX 表示，LxX 代表外部线（或包围层），Ly 或 LyX 代表内部线（或芯）。

（3）组合铝—钢导线用 JLxX/Gyz 或 JLxX/LB 表示，LxX 表示外部铝线（或包围层），Gyz 或 LB 代表钢芯。在镀锌钢线标示中，y 代表钢的牌号（普通强度、高强度或特高强度），z 表示镀锌层的级别（A 或 B）。

型线同心绞架空导线标志如下：

（1）以 LY9X 铝的等效导电面积（mm^2）表示的代码。

（2）以芯材面积（mm^2）表示的代码，若使用。

（3）构成导线的单线，其牌号的标示，对组合导线首先标示包围层，然后标示芯。

（4）以导线的标称直径表示的数字。

6.5 自阻尼导线和含有一层或多层自支持层的同心绞架空导线

国际电工委员会 IEC/TC7 正在制定新的《含有一层或多层支持层的同心绞架空导线》，这个标准实际上就是原称的“间隙型导线”和“自阻尼导线”的合一标准。

由微风引起的振动，使架空线路导线的断股事故时有发生，它直接危及线路安全。一种能充分吸收导线振动能量的新型导线—自阻尼导线，被实际应用。自阻尼导线使线路导线的振动降低到线路所允许的安全水平，即使适当提高架设导线的应力，也就是说，可加大档距，或降低杆塔高度，减少了线路的造价，线路仍安全运行。自阻尼导线由增加强度的内芯线和导电的外层线所组成，内芯线与外层线之间保持有一定间隙，由于它们的固有频率不同，在微风引起振动时，内芯线和外层线相互碰撞而使导线受到阻尼。

我国曾开发了 400mm^2 和 300mm^2 的自阻尼导线，导线的外层均采用两层拱形铝线结构，各共有 5 个型号，分别为 LGJ/ZD—400/（16）、（13）、（10）、（7）和（5）及 LGJ/ZD—300/（16）、（13）、（10）、（7）和（5），其结构性能与美国标准 ASTM B701 相一致。表 3.4-40 示出了 LGJ/ZD—400 与 LGJ—400/50 导线的性能比较。对 LGJ/ZD—400、300mm^2 的各种型号做试验，并与相应的钢芯铝绞线在不悬挂与悬挂防振锤、护线条的各种状态下作比较，获得自阻尼导线比相应的钢芯铝绞线优越，阻尼性能要高出十几倍至几十倍，防振能力好得多，与普通钢芯铝绞线加挂防振锤与护线条等防振措施后相比，阻尼性能优些或基本相同；自阻尼导线的平均运行应力由 25%UTS 提高至 30%UTS 或 35%UTS 仍有良好的防振性能。

1988 年在广西大化水电站至马山县那落岭的 110kV 输电线路上，架设 LGJ/ZD—300（13）自阻尼导线进行运行试验。

表 3.4-40 LGJ/ZD—400 与 LGJ—400/50 导线的性能比较

导线		单位	LGJ—ZD—400/（13）			LGJ—400/50	
结构			24Al 拱/7st			24Al/7st	
铝钢截面比			—			8	
						—	
铝截面积		mm^2	400			400	
单位质量		kg/km	1491			1491	
计算总拉断力		N	104 860			104 860	
导线平均运行应力		%UTS	30	35	16	25	28
运行时平均拉力		N	31 458	36 700	16 788	26 215	29 360
跨距①	220kV 线路，弧垂 11.3m 时	m	421	439	214	388	411
	500kV 线路，弧垂 13m 时	m	450	468	335	414	439
杆塔基数①	220kV 线路，每千米基数	基	2.79	2.68	3.75	3.03	2.86
	550kV 线路，每千米基数	基	2.61	2.1	3.51	2.84	2.68
在 40℃，400m 跨距下的弧垂		m	10.46	9.61	18.21	12.17	10.91
能节省杆塔高度②		m	1.71	2.56	−6.04	0	1.26

注 本资料由华东电力设计院提供。

① 跨距和杆塔基数计算条件为：覆冰为 0；气温 θ=15℃时，风速 V=25～30m/s；最低气温 θ_{min}=−10℃。

② 能节省杆塔高度，以 25%UTS 的杆塔高度为准。

6.6 光纤组合（复合）架空相导线（OPPC）

2005 年 11 月我国第一条 OPPC 光纤组合（复合）相导线电力线路（OPPC 导线，由国外引进）在深圳建成并正式投入运行，这对其在我国的推广应用具有示范的意义。

光纤组合相导线（Optical Phase Conductor，OPPC）是电力通信系统的一种新型特种光缆，是将光纤单元组合在导线中的光缆，可以充分利用电力系统自身的线路资源，特别是电力配网系统。与其他电力光缆相比，OPPC 可长期带电作业，其最大的优点就是光缆施工简单，费用较低。解决了电力系统近几年存在的大量光缆接头盒被盗的问题。

早在 20 世纪 80 年代，一些国家就将 OPPC 应用于 150kV 以下的电力线路中，目前，OPPC 已在欧美国家架设运行。据悉，我国 35kV 及以下线路一般都采用三相电力系统传输，大多都没有地线，系统的电力通信采用传统的方式进行。如果用 OPPC 替代三相电力线路中的一相，形成由两根导线和一根 OPPC 组合而成的三相电力传输系统，则不需要另外架设通信线路就可以解决这类电网的自动化、调度、通信等问题，并可大大提高传输的质量和数量。

6.7 复合碳纤维加强的铝（或耐热铝合金）组合导线

复合碳纤维加强的架空铝（或耐热铝合金）导线是一种新颖的架空导线，目前美国和日本正处试运行和深入开发的阶段。美国复合技术公司（Composite Technology Corporation，CTC 公司）开发的此种导线称为 ACCC 复合碳纤维架空导线；日本称为 ACFR 碳纤维加强架空铝导线。它的线芯是由碳纤维为中心和玻璃纤维用高分子聚合物复合起来。这种芯，日本称为 CFCC，由碳纤维和改性环氧树脂作为基体树脂做成。与通常使用在钢芯铝绞线（ACSR）中的镀锌钢线相比，碳纤维芯显得更轻，而且在高温下具有更小的伸长。表 3.4-41 示出了具有相同规格（160mm^2）的 ACFR 用的 CFCC 和 ACSR 用的钢绞线的主要特性比较。可以看出：CFCC 的重量和热膨胀系数仅为钢绞线的 1/5 和 1/12，而两者的拉断力几乎相等。日本也正在开发“耐热碳纤维加强架空铝导线（TACFR）”，由于 TACFR 改善了耐热性，所以其目的在于代替通常的 TACSR（“钢芯耐热铝合金导线”）。表 3.4-42 示出了 ACFR 和 ACSR、TACFR 和 TACSR 导线的特性。

表 3.4-41 160mm^2 钢绞线和 CFCC 之间的特性比较

项目	特性	
型式	CFCC	钢绞线
耐热级别	普通级	耐热级
绞线的股数和直径（mm）	7/2.6	7/2.6
计算截面积（mm^2）	37.16	37.16
外径（mm）	7.8	7.8
质量（kg/km）	61.0	291.3
拉断力（kN）	57	44
弹性模数（N/mm^2）	137 000	206 000
热膨胀系数（$\times10^{-6}℃^{-1}$）	1.0	11.5

表 3.4-42 （160mm^2）同截面 TACFR 和 TACSR 之间的特性比较

项目		特性			
导线		ACFR	ACSR	TACFR	TACSR
标称截面（mm^2）		160	160	160	160
工作温度（℃）	连续	90	90	150	150
	短时	120	120	180	180
绞线的股数和直径（mm）	铝	30/2.6	30/2.6	30/2.6	30/2.6
	芯	1/7.8	7/2.6	1/7.8	7/2.6
20℃直流电阻（Ω/km）	—	0.182	0.182	0.182	0.182
连续载流量（A）	—	454	454	705	705
计算截面积（mm^2）	—	196.5	196.5	196.5	196.5
外径（mm）	—	18.2	18.2	18.2	18.2
质量（kg/km）	—	502.5	732.8	502.5	732.8
拉断力（kN）	—	68.9	68.4	68.9	68.4
弹性模数（N/mm^2）	转变温度或以下	76 000	89 100	76 000	89 100
	转变温度或以上	137 000	206 000	137 000	206 000
热膨胀系数（$\times10^{-6}℃^{-1}$）	转变温度或以下	15.5	18.0	15.5	18.0
	转变温度或以上	1.0	11.5	1.0	11.5

碳纤维加强架空铝导线的主要优点在于：

（1）与传统的钢芯铝绞线相比，约可提高1倍的输送功率，且可使用通常的安装方法、工具和金具，不需专用工具或培训。

（2）可减少高温弧垂。

（3）没有芯材与铝导线之间的电化腐蚀问题。

（4）导线无磁感应的芯。

（5）可用以代替已有线路的导线，不需改变杆塔结构，达到增容的目的。

我国由远东复合技术有限公司和美国CTC公司合作生产的ACCC复合碳纤维导线，已于2006年6月同时在南方电网公司深圳电力公司和国家电网公司辽宁省电力公司的220kV线路上挂网运行试验。仅半年时间，我国从美国进口了500km左右的复合碳纤维铝导线用于福建、辽宁、深圳、江苏等地的8条线路上试挂运行，成为世界上试挂线路最长的国家。由远东复合技术有限公司委托、提供的ACCC复合碳纤维导线—复合芯梯形单线（退火）同心层绞铝导线（型号为ACCC/TW）一试样，经上海电缆研究所电工材料及特种线缆质检中心检测，检验结论是：来样所测性能符合《美国CTC公司1020 Kcmil DRAKE ACCC/TW（22Wire）技术规范》要求。该产品使用软梯形铝线（22根）与1根复合碳纤维芯的同心绞结构。也因为使用软的（梯形）铝线，所以当导线受拉应力时，铝和复合碳纤维芯之间的应力分配，主要分配在加强芯上，这有利于提高线路的运行温度。有关该种导线的测试结果示于表3.4-43中。

表3.4-43　1020 Kcmil DRAKE ACCC/TW（22Wire）导线的测试结果

序　号	项　　目	单　位	标准要求	检验结果
1	结构尺寸			
1.1	铝线根数	根	22	22
1.1.1	内层	根	8	8
1.1.2	外层	根	14	14
1.1.3	铝线截面积	mm^2	—	516.7
1.2	复合芯根数	根	1	1
1.3	铝线等效直径	mm	内层5.42±0.05	5.40
			外层5.56±0.06	5.53
1.4	复合芯直径	mm	9.50±0.09	9.53
1.4.1	复合芯截面积	mm^2	70.9±1.4	71.3
1.5	导线总截面积	mm^2	—	587.9
1.6	导线直径	mm	28.14±0.28	28.31
2	表面质量	—	表面不应有肉眼可见的缺陷，如明显的压痕以及与良好商品不相称的任何缺陷	通过
3	绞制			
3.1	绞向	—	相邻层绞向应相反，最外层绞向应向右	相反，右向
3.2	均匀紧密性	—	每层单线应均匀紧密地绞合在下层中心线芯或内绞层上；在切断绞线后，所有铝线都不松散或容易用手复位	紧密，不松散
3.3	节径比	—	任何层的节径比应不大于其紧邻内层的节径比	
3.3.1	内层	—	10～16	13.0
3.3.2	外层	—	10～13	10.7
4	复合芯性能			
4.1	单位重量	kg/km	130±2.6	130.7
5	铝线性能（绞后）			
5.1	抗拉强度	MPa	60～95	80.8
5.2	20℃直流电阻率	$\Omega \cdot mm^2/m$	≤0.027 37	0.027 05
5.3	电导率	%IACS	≥63	63.7
5.4	卷绕		不断裂	未断裂
5.5	伸长率（L_0=250mm）	%	≥21	27.7
6	导线单位长度质量	kg/km	1556±31.1	1562
7	导线20℃直流电阻	Ω/km	≤0.054 09	0.053 94
8	导线和复合芯计算拉断力	kN		导线182；复合芯153.1
9	导线及复合芯握力试验	kN	导线和复合芯安装楔型线夹后的握力分别不小于163.8kN和137.8kN	导线握力：208.5、171.0、199.0 ϕ9.5复合芯握力：147.0、156.0

续表

序 号	项 目	单 位	标准要求	检验结果
10	导线的高温拉力试验	kN	不小于 145.4	导线拉力：158、160 由于复合芯的热膨胀系数比软铝线的小得多，在 150℃下所有拉力都加载在复合芯上，故铝线基本不承受拉力，所以高温下导线的拉力与复合芯的拉力基本一致
11	导线的热膨胀试验	$\times10^{-6}$ ℃$^{-1}$		拐点温度（120℃左右）以下为 12.5×10^{-6}℃$^{-1}$，以上为 7.1×10^{-6}℃$^{-1}$
12	复合碳纤维芯盐雾腐蚀试验			复合碳纤维芯在 5%NaCl 盐雾气氛下 360h 试样无腐蚀
13	导线弧垂特性试验			见图 3.4-55
14	导线及复合芯压扁试验			正常
15	导线过滑轮试验			导线未见起灯笼现象和明显松股，但软铝线表面有擦痕；过滑轮后铝单线抗拉强度均在 60～95MPa 范围内，铝线强度没有明显提高
16	导线的蠕变试验			蠕变量：据在 15%、25%和 40%张力下的蠕变方程可推算出 10 年（87 600h）后的蠕变量分别为 280mm/km、452mm/km 及 901mm/km
17	导线振动疲劳试验			3 根试样分别经 3.03×10^7 次、3.00×10^7 次和 3.01×10^7 次连续振动疲劳试验后，打开线夹进行拆股观察，未见有任何开裂断股现象，通过耐振疲劳试验
18	导线载流量试验			无风、无日照和自然对流条件下载流量试验结果 导体温度（℃） / 环境温度（℃） / 载流量（A） 40.0 / 12.9 / 452 59.3 / 12.8 / 600 79.2 / 12.8 / 670 89.9 / 13.0 / 830 99.6 / 13.2 / 880 109.4 / 13.3 / 914 119.7 / 13.4 / 950 129.9 / 13.5 / 1010 139.5 / 13.5 / 1044 150.4 / 13.5 / 1104 导线允许的使用最高温度 200℃以及具有低弧垂特性，因此导线的载流能力与相当的钢芯铝绞线相比有明显优势
19	导线电晕及无线电干扰试验		导线的可见电晕和无线电干扰电压试验结果，均满足 220kV 输电线路的运行要求	
20	导线及复合芯应力—应变试验		导线的最终弹性模数为：58.6GPa、60.2GPa、59.8GPa，平均 59.5GPa 碳纤维复合芯的最终弹性模数为：112.6GPa、112.8GPa、114.5GPa，平均 113.3GPa	

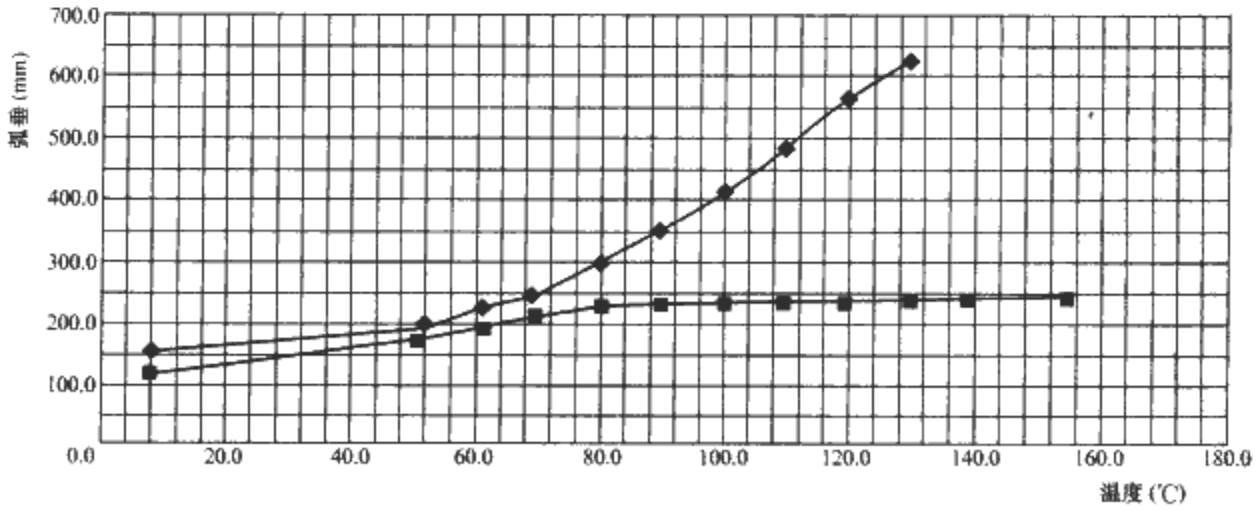


图 3.4-55 架空绞线弧垂—温升曲线

—◆—LGJ—400/50；—■—Drake

第5章　铝合金导体

铝合金导体用于架空导、地线和变电站大电流母线时主要取其强度和耐热性，故一般使用的是硬拉铝合金线；当用于电线电缆的室内配电线、通信电缆、电磁线和电气装备用线时，往往使用退火的软线。铝合金导体亦用于电缆的屏蔽编织线、铠装线和电子用键合线等。按对铝合金导体性能的要求，主要涉及 Al—Mg—Si、Al—Zr、Al—Mg、Al—Fe、Al—Si、Al—Nb 等二元、三元和四元合金。

1　不同用途对铝合金导线的要求

由于用途的不同，对铝合金导线的性能要求是不同的，因此，国内外开发了不同用途和性能的导电用铝合金导线。此种导线的牌号甚多，且较乱，难于形成统一的系列牌号，而且有的牌号随着技术的进步已被新的合金型号所淘汰。表 3.5-1 概要列出了不同用途对铝合金导线的性能要求。

20 世纪 60 年代以后中国和世界各国导体以铝节铜有了较大的发展，其原因一方面由于铜的蕴藏量远比铝少，中国尤甚；另一方面在国际市场上铜价波动极大。国外在此期间铝合金的使用范围已从架空导线扩大到了电磁线、绝缘电线、通信电缆、电力电缆、变电站大电流母线和屏蔽编织线等方面（见表 3.5-2）。我国在此期间，铝合金线的品种和应用范围落后于国外，但随着电力、通信事业的迅速发展，对铝合金的品种和数量已逐渐增加起来了。例如，架空导线用铝合金不仅 Al—Mg—Si 高强度导线的需求量在增加，而且也提出了对中强度铝合金导线的需求；耐热铝合金在品种上已开发出了电导率为 60%IACS 的高导电耐热铝合金和高强度（实际为中强度，见下节介绍）耐热铝合金；射频同轴电缆用的屏蔽编织线（Al—Mg 合金）已获得普遍的应用，以代替镀锡铜或铜的编织线。目前世界铜价暴涨，我国具有开采价值的铜矿的发现依然不多，这将影响和推动新一轮以铝节铜的发展。

表 3.5-1　不同用途对铝合金导线性能的要求

电线电缆		要求性能							铝合金牌
品种	用途	导电性	强度	耐热性	伸长率	弯曲性	耐蚀性	接续性	
架空导、地线和变电站用线	高强型	○	☆	△	△	—	△	△	6201、Aldry、1 号合金、SI-33、Silmalec、Almelec、6101 等
	中强型	○	☆	△	△	—	△	△	KAL、SI-26、5005 等
	耐热型	○	☆ △	☆	△	—	△	△	TAL、KTAL、SSTAL、60% TAL、AT1、AT2、AT3、AT4 等
	耐蚀型	○	△	△	△	—	☆	△	Al-Nb
绝缘电线电缆	屋内配电线	○	○	○	☆	○	△	☆	Cond-Al、Triple E、CM71、CK76、Ms-Al、VUK33-E、Ductal-R 等
	通信电缆	○	○	☆	☆	☆	△	☆	
	电磁线和电气装备线	○	△	☆	☆	○	△	☆	
编织线	屏蔽线	○	☆	△	☆	△	○	△	Al-Mg 型、Al-Mg-Si 型
电力电缆	铠装线	—	☆	△	△	—	△	△	同架空导线、地线用高强型
电子用线	键合线	○	○	—	—	—	○	☆	Al-Si 型

注　☆—特别重视；○—重视；△—与电工铝相同。

2　导电用铝合金线的合金系、合金主要组成和牌号

表 3.5-2 概要列出了主要国家铝合金导体的合金系、合金主要组成和牌号。

3　高强度铝合金线

一般抗拉强度在 300MPa 左右，称高强度铝合金线，而抗拉强度为 250MPa 左右的则称中强度铝合金线。到目前为止，高强度铝合金线均属热处理型的 Al—Mg—Si 合金系。该类合金牌号甚多，如有 Aldrey（瑞士）、Silmalec（英国）、Almelec（法国）、6201（美国）、6101（英国）、イ号（日本）、AЖ（前苏联）和 SI-33（日本）等。最早的 Aldrey 虽出自 1921 年，但至今基本未变，一直沿用至今。它们主要用于电导率可稍差一点，但要求高强度的场合，如架空导线（特别是大跨越导线和铁塔档距大的架空导线），在电缆中作为机械加强材料用以代替铠装钢丝。高强度铝合金线的合金系和元素组成虽然不变，但随着技术的发展，在制造工艺和制造装备上有了新的发展。表 3.5-3 列出了主要牌号的性能。

表 3.5-2 主要国家铝合金导体的合金系、合金主要组成和牌号

序号	国别	使用特征	成分系列	合金主要组成元素（%）														合金类型	合金牌号或制造厂	
				Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Sb	Zr	Co	Be	Sn	Nb	Ca	稀土元素	铝		
高强度铝合金																				
1	中国	高强度	Al—Mg—Si	0.5～0.65	0.5～0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	√	余	热处理	LHA1 LHA2
2	瑞士		Al—Mg—Si	0.3～0.5	0.4～0.7	0.2～0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		Aldrey
3	英国		Al—Mg—Si	0.5	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		Silmalec
4	法国		Al—Mg—Si	0.7～0.75	0.5～0.6	0.3～0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		Almelec
5	美国		Al—Mg—Si	0.6～0.9	0.5～0.9	0.5	0.1	0.3	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	余		6201
6	苏联		Al—Mg—Si	0.4～0.8	0.4～0.8	<0.14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		АЛДш
7	日本		Al—Mg—Si	～0.5	～0.5	0.25	0.005	0.005	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		イ号铝
8	日本		Al—Mg—Si																半热处理半加工硬化	SI-26
9	日本		Al—Mg—Cu—Sb	0.2～0.3	—	—	0.6～1.5	—	—	0.2～0.8	—	—	—	—	—	—	—	余	加工硬化	日立
中强度铝合金																				
10	美国	中强度	Al—Mg	0.5～1.1	0.4	0.7	0.2	0.2	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	余	加工硬化	5005
11	日本		Al—Mg—Si																半热处理半加工硬化	SI-26
12	日本		Al—Mg—Cu—Fe—Sb	0.1～0.2	—	0.1～0.2	0.1～0.2	—	—	√	—	—	—	—	√	—	—	余	加工硬化	MS-AL
13	日本		Al—Mg—Fe	≤0.3 (0.17)	—	≤0.7 (0.5)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		KAL
14	法国		Al—Mg	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		Aluflex
15	美国		Al—Mg—Cu—Fe	0.12	—	√	0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		CM-71
16	日本		Al—Mg—稀土	0.02～2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.6	余	—	古河
17	日本		Al—Mg—稀土	—	—	—	0.1～1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(1～2 种) 0.04～2.0	余	加工硬化	古河
			Al—Cu—Sn	—	—	—	0.1～1.0	—	—	—	—	—	—	0.05～0.5	—	—	—	余		
			Al—Cu—Be	—	—	—	0.1～1.2	—	—	—	—	—	0.04～0.5	—	—	—	—	余		

续表

序号	国别	使用特征	成分系列	合金主要组成元素（%）														合金类型	合金牌号或制造厂	
				Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Sb	Zr	Co	Be	Sn	Nb	Ca	稀土元素	铝		
耐热铝合金																				
18	中国	耐热	Al—Zr—Y	—	—	—	—	—	—	—	√	—	—	—	—	—	√		非热处理	
19	中国		Al—Zr—Fe—Cu	—	—	√	—	—	—	—	√	—	—	—	—	—	√		热处理	
20	美国		Al—Mg—Fe—Si	(0.33) 0.3～0.4	0.12	(0.43) 0.4～0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余	热处理	Cond-Al
21	日本		Al—Zr	—	—	—	—	—	—	—	0.15	—	—	—	—	—	—	余	加工硬化	TAL、ST等
22	日本		Al—Zr—稀土	—	—	—	—	—	—	—	√	—	—	—	—	—	Y	余		60% STAL等
23	美国		Al—Fe—Co	—	—	0.5	—	—	—	—	—	0.75	—	—	—	—	—	余	—	Super T
24	苏联		Al—Mg—Si—Fe	0.4	0.16	0.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余	—	铝合金A
				0.42	0.17	0.47	0.03	—	—	—	—	—	0.03	—	—	—	—	余	—	铝合金B
				0.55	0.30	0.45	0.53	—	—	—	—	—	0.05	—	—	—	—	余	—	铝合金C
25	日本		Al—Zr—Ca	—	0.25以下	0.10以下	—	—	—	—	0.01～0.5	—	—	—	—	0.02～2	—	余	—	住友
26	日本		Al—Zr—稀土	—	—	—	—	—	—	—	0.1～0.5	—	—	—	—	—	La，Ce（1～2种）0.5～4	余	热处理	古河
27	日本		Al—Zr—稀土—Sn(Cd)	—	—	—	—	—	—	—	0.02～0.5	—	—	0.01～0.5	—	—	（1～2种）0.2～4	余		古河
绝缘电线电缆导电线芯、编织线、电子线用铝合金																				
28	美国	芯线和细线	Al—Fe	—	—	0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余	—	Triple-E
29	美国		Al—Fe—Mg															余	—	CK76
30	美国		Al—Mg—Cu—Fe	0.12	—	√	0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余	加工硬化	CM71
31	日本		Al—Mg—Cu—Fe—Sb	0.1～0.2	—	0.1～0.2	0.1～0.2	—	—	√	—	—	—	—	√	—	—	余		MS-AL
32	捷克		Al—Mg—Si—Fe	0.9	0.35	0.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余		VUK33-E
33	美国		Al—稀土	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1(混合稀土)	余	热处理	—
34	美国		Al—稀土	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5FeCe，FeCe和混合稀土最多达2.5	余	加工硬化	Western Electric
35	日本	特细接线	Al—稀土	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3混合稀土	余		Ductal-R
36	日本		Al—Si	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	余	—	
37	中国	编织线	Al—Mg	3.2～3.9	√	√	√	√	—	—	—	—	—	—	—	—	—		加工硬化	1.6%～2.5%铬
38	美国		Al—Mg	3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		加工硬化	1.5%其他元素

表 3.5-3　　高强度铝合金主要性能

性能	合金								
	LHA1	LHA2	Aldrey	Silmalec	Almelec	6201	1	AЖ	SI—33
抗拉强度（×9.8MPa）	32.1～33.2	≥30.1	32～34	>30	≥33	>31	31.5	>30	33.5
伸长率（%）	≥3.0	≥3.5	6～9	>3.5	≥3	>3	3～4	4	5
电导率（%IACS）	≥52.5	≥53.0	52.5	>53	>53	52.5	>52.5	>53	54

3.1 高强度铝合金线制造

以前对高强度铝合金采用三步法制杆，即先铸成线锭、进而热轧成杆，然后进行固溶化热处理和淬火，现在各国均采用一步法经连铸连轧一个过程获得要求的高强度铝合金杆。用连铸连轧法制杆，其装备实际上对制造铝杆或高强度、中强度铝合金杆或耐热铝合金或铝镁合金杆等都是通用的，工艺过程也是差不多的，只是在材料组成（配方）和工艺上有不同而已。国外最先进的铝和铝合金制杆生产线，已达到了只需一个起动电钮就可实现整个生产过程的全自动化。这样不仅生产率高，而且工艺参数稳定，减少了人为因素对杆质量的影响，有利于半成品杆质量的稳定，为成品铝和铝合金线质量的稳定奠定了基础。在这方面我国与国外相比尚有相当大的差距，需要对相当多的生产线进行技术改造。高强度铝镁硅合金线的配方虽已很老，没有什么专利保密可言，但真要做得质量稳定，成品线成品率高，尽量在使用中不出现或少出现脆断，对制造厂而言，也不是轻而易举的事，提醒我们的制造者需要切实地关注的。图 3.5-1 示出了热处理型 Al—Mg—Si 合金线的生产工艺流程。

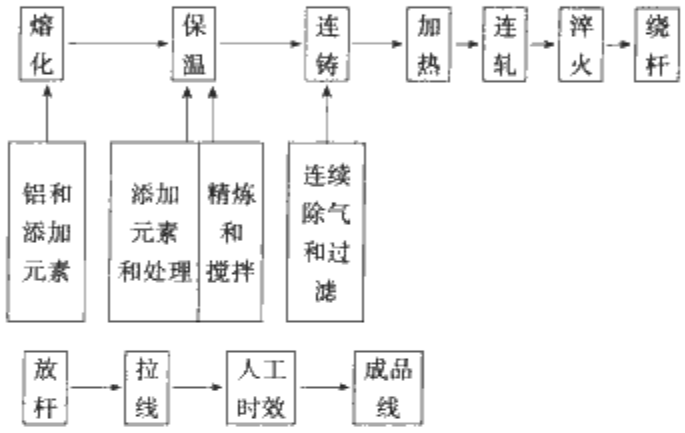


图 3.5-1 热处理型铝合金线生产工艺流程

3.1.1 制造导电用高强度铝合金线的主要工艺参数

(1) 合金成分：合金的标准成分约为 0.5 重量%Mg、0.5 重量%Si 和加入适量 Ce 或 La 为主的混合稀土金属，稀土的加入，一般可起到微合金化的作用，一定的除氢、精炼净化的作用、细化晶粒、变质的作用，还有提高电导率的作用。

(2) 熔铸工艺参数：

熔炼温度：≤760℃。

精炼温度：730～740℃。

保温静置温度：720～730℃。

出炉温度：720～730℃。

出锭炼温度：约 500℃。

精炼剂加入量：炉料量的 0.3%～0.4%。

保温静置时间：约 40min。

氮气用量：2～3m³/h［压力（5～71.02）×10⁻⁶Pa］。

浇铸速度：为纯铝浇铸的 80%～90%。

浇铸冷却水：进水温度：小于 30℃。

水压：不小于 3Pa。

冷却水用量（较纯铝为少）。

内冷水：约 35m³/h。

外冷水：约 15m³/h。

(3) 轧制工艺参数及铝合金杆性能（见表 3.5-4）：

铸锭进轧温度：470℃以上。

杆终轧温度：360℃以上。

经水冷后杆温：100℃以下。

轧制乳浊液温度：≤60℃。

冷却水压：≥3Pa。

压缩空气压力：≥4×1.02×10⁻⁶Pa。

表 3.5-4 铝合金杆性能

杆标称直径（mm）	直径偏差（mm）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	电阻率（Ω·mm²/m）
9.5	±0.5	>167	≥7	≤0.033 6 约 51.3%IACS

(4) 拉线和人工时效。碳化钨模入口角 100°、工作角 12°～16°，拉线后 36h 测量性能：抗拉强度大于或等于 275MPa、伸长率大于或等于 2.0%、电阻率小于或等于 0.034 4Ω·mm²/m（约 50.1%IACS）。

人工时效是决定高强度铝合金线的关键，时效温度和时间取决于合金的成分、加工变形程度及拉线所用的设备类型等因素。人工时效加热温度范围比较窄，故生产时必须力求加热均匀。为此炉内各点温度差要求为±3℃。人工时效控制时效温度约 155℃±3℃，时效时间 3.5～4h，经时效处理后，线的性能应达到标准或用户的技术要求。可以看出，通过人工时效处理后，线的抗拉强度、伸长率、电导率都获得了明显的提高。

3.1.2 制造导电用铝合金线的主要工艺装备

目前我国生产铝和铝合金线的工艺装备主要由我国自行研究、设计和制造。这些装备主要有：

(1) 竖炉和保温炉——8～10t 的倾动式保温电炉已获得了应用，并同时测定炉膛和铝液的温度，以精确监控铝液的温度。

(2) 炉外连续除气和过滤装置——对铝合金杆而言，除气更需加强，除在保温炉内采用精炼喷粉器用氮气将精炼剂喷入铝液内精炼除气（主要是氢气）外，同时采用炉外连续除气。除气装置有不少形式，一般采用双柱式可旋转连续除气装置。它有一个旋转的除气转子和一个配有升降装置的加热装置，可以自由的升降或旋转，使用时将其插入除气装置除气，不用时将其升起转到一边，便于清除铝液和排除故障。除气剂主要为纯氮（含 99.999%氮，$H_2O+O_2 \leqslant 5\times10^{-4}\%$），也有用四氯化碳和氮气的混合气体，效果较好，但四氯化碳有毒，应注意劳动保护。铝液连续除气后，用泡沫陶瓷过滤器过滤铝液中的微小颗粒和夹杂，最后铝液通过上、下浇包后，进入连铸机进行浇铸。

(3) 连续浇铸机——一般采用 5 轮式连续浇铸机（见图 3.5-2）和 H 型结晶轮轮槽，结晶轮直径决定了连铸连轧生产线的产能、结晶轮轮槽的型式与铸条（坯）冷却效果密切相关。5 轮式铸机的优点在于：钢带不与引桥交叉干涉，方便高强度铝合金铸条的顺利引出，可避免铸条产生裂纹；H 型轮槽可使铸条四面冷却，而且冷却面大，冷却效果好。为了方便钢带的安装和拆卸，以及将坑内废铝的清除，内冷却水采用中心管进水方式，外冷和侧冷采用如图

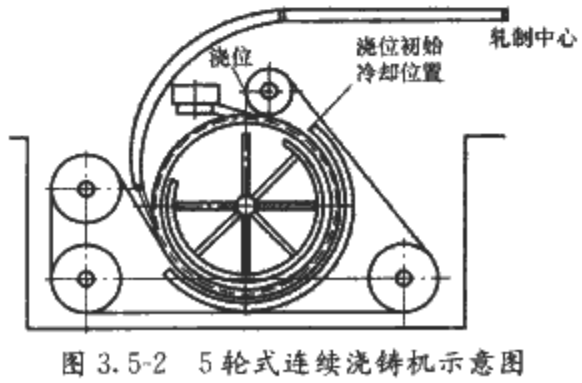


图 3.5-2 5 轮式连续浇铸机示意图

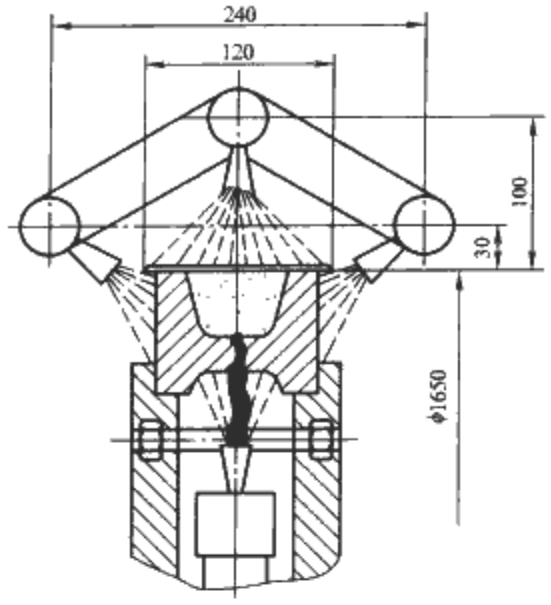


图 3.5-3　外冷和侧冷喷水方式

3.5-3 的喷水方式。

（4）连轧机组及控温系统——国产 φ255/2+12 连轧机组是专为生产铝合金杆而设计制造的。这种连轧机集两辊连轧机和三辊连轧机的优点于一身。第一、二道采用两辊机架，其压缩比大，有利于将铸条更好地变形，而第三至第十四道采用三辊机架，发挥出三辊连轧机变形均匀的特点，有利于铝合金杆在后面道次的稳定轧制。

为了保证铸条进入轧机以前达到高强度 Al-Mg-Si 合金配方应有的固溶温度，并尽可能使这个温度恒定，所以要采取加热措施和测温、控温。为此可采用如工频感应加热等装置进行通过式加热，并安装红外等仪器连续测定进轧温度。在铸条轧制过程中，对乳化液的测温和控温，铝合金比纯铝具有更重要的意义，以保证在各种季节、工作的自始至终，使乳化液的温度都能满足工艺的要求。

（5）铝合金杆的冷却装置——铝合金杆离开轧机后先进入乳液冷却出线管，再进入清水冷却出线管。在每道出线管出口处，装有气体吹除装置，以把出线管出口处杆上沾的液体吹掉。这样，可能会引起乳液和清水混淆，故也有全部使用清水冷却，并在冷却水管前加装润滑脂出线管，根据用户要求和工艺需要，涂沫润滑脂后再进入清水冷却管冷却，也可取得较好的效果。冷却后铝合金杆的温度应在 80～100℃以下。

（6）绕杆装置——国产连轧机组的绕杆都采用篮筐式松成圈的办法。铝杆在厂内运输和使用还算方便，但要远销他地，那就不方便了，因此要使用紧捆的排杆成捆装置。设计和使用这种装置，其关键是对铝杆的成功“捕捉”率，尽可能要达到 100%，否则将给生产带来麻烦。

（7）铝合金拉线机和连续退火装置——拉铝合金线用的拉线机、连续退火装置、润滑剂及其润滑系统，一般而言是可以和拉铝线通用的（详见第 4 章相关章节）。但从材料来看，铝合金的塑性毕竟比纯铝差，因此拉线配模的压缩率不宜取得太大；拉铝合金线用的大拉机适于采用直线式滑动或无滑动拉线机，如采用非滑动蓄线式大拉机，由于在道次间“过路线”上引和下拉致使线产生扭转而易于断线。生产铝合金硬线，其抗拉强度往往是受控的关键指标之一，从而拉线速度的控制和润滑剂及其系统的控温和过滤就显得更需重视。

（8）人工时效炉——这是保证产品性能达到要求的关键设备之一。有箱式和连续式两种，当然后者在技术上更先进，但投入也多。总之，要求炉温均匀，炉内各点温度差要求达到±3℃。

3.2　高强度铝合金线标准

JB/T 8134—1997（idt IEC 104：1987）“架空绞线用铝—镁—硅系合金圆线”标准，根据力学和电气性能的不同分为 LHA1 和 LHA2 两种型号。表 3.5-5、表 3.5-6 分别列出了高强度铝合金线的力学、电气性能和有关的技术参数。有关线径的公差应符合表 3.5-7 的要求。

表 3.5-5　高强度铝合金线的电阻率和计算用有关技术参数

技术参数	LHA1 型	LHA2 型
20℃时的电阻率，最大值（Ω·mm²/m，×10⁻³）	32.840（52.5%IACS）	32.530（53.0%IACS）
20℃时的密度（kg/dm³）	2.703	2.703
线膨胀系数（℃⁻¹）	23×10⁻⁶	23×10⁻⁶
20℃时的电阻温度系数（℃⁻¹）	0.003 6	0.003 6

表 3.5-6　高强度铝合金线的机械性能

标称直径 d（mm）	LHA1 型		LHA2 型	
	抗拉强度最小值（MPa）	伸长率（L_0=250mm）最小值（%）	抗拉强度最小值（MPa）	伸长率（L_0=250mm）最小值（%）
$d\leqslant 3.5$	325	3.0	295	3.5
$d>3.5$	315	3.0	295	3.5

表 3.5-7　高强度铝合金线的直径和直径公差

标称直径 d（mm）	公　差
$d\leqslant 3.00$	±0.03（mm）
$d>3.00$	±1%d

4　中强度铝合金线

过去，我国没有开发和应用导电用的中强度铝合金，但随着架空线路向大容量、超高压发展，采用分裂导线和导线的大截面化、耐热化也逐渐发展起来了。这样不仅需要耐热铝合金线，而且也需要全铝合金绞线和用高强度合金线代替钢芯的中强度和高强度铝合金绞线，以提高导线的载流量。

中强度铝合金线主要以硬线用于架空导线，但也有以软线用作电线电缆的导电线芯。中强度铝合金线的牌号是很多的，现举例，如表 3.5-8 所示，它们大约的成分见表 3.5-2。

表 3.5-8　中强度铝合金的主要牌号和性能

性　能	中强度铝合金						
	KAL	SI-26	MSAL	FAAL	AH	Ductalex	5005
抗拉强度（MPa）	25～26.1	25～27	24.5	22～26.5	>22	23.5～26.5	>22.4
伸长率（%）	4.7～6.1	5.5	—	—	—	—	1.3～2.2
电导率（%IACS）	58.8～59.1	58.5～59.5	58.5	>58	>58.2	59.0	>53.5
疲劳极限（9.8MPa）	8.20	9	—	—	—	—	9

中强度铝合金线一般都属于非热处理的加工硬化型合金当然也有例外的情况，如“SI—26”合金就是一例。在这类合金中发展最早的 Al—Mg“5005”合金是美国在 1956 年研制成功的。“5005”合金在美国已实用化，并曾在 500kV 的架空线路上用过。此种合金存在铸造和加工比较困难以及电导率比较低的缺点，因此推广就有一定的困难。为了改进这种合金，已出现了像“MS—AL”、“SI—26”、“KAL”和“CM71”等新牌号的合金。这些合金，一般都从成分入手来改善合金的性能，同时也考虑改善其耐蚀性和加工工艺等性能。从这类合金的成分上看（见表 3.5-2），除铝－镁系外，又研究发展了铝－镁－稀土系、铝－镁－铜系、铝－铜－铍系、铝－铜－稀土系、铝－铜－锡系、铝－镁－铁系和铝－铜－镁－铁－锑系等。

加工硬化型的“MS-AL”合金由日本古河电气公司在 1965 年研究成功，并于 1969 年开始生产。这种合金的电导率高，蠕变性能较好，价格也比较低。它是在铝－镁系和铝－镁－稀土系基础上发展而成的铝－镁－铜－铁－锑多元合金，其中铜、镁、铁各加 0.1%～0.2%，以提高合金的强度；此外再加入铌，这不仅改善了合金的耐蚀性，并可造成镁锑析出物的弥散硬化，有利于改善蠕变性能。当然由于 Al_3Fe 析出物的弥散粒子也抑制了蠕变变形，而且由于添加了原子半径比较大的镁，结晶格子产生畸变，引起固溶硬化；再加上原子半径小的铜，使畸变加大，也造成固溶硬化。

美国 1970 年发展的“CM71”铝—镁—铜—铁系加工硬化型合金（它的主要成分是含铜 0.4%、镁 0.12%），具有与 MS-AL 同样优良的蠕变性能，所以适于代替软铜线作绝缘电线电缆导电线芯用线。

KAL 合金是由日本于 1969～1970 年开发的铝—镁—铁系非热处理合金，这种合金适于做架空导线使用。属于铝—镁—铁系的合金还有美国 Alcoa 和 Western Electric 公司的“CK76”，它是在 1969 年研制成功的。

现以非热处理的加工硬化型 KAL 和半热处理半加工硬化型 SI-26 为例，作进一步的介绍。

4.1 非热处理加工硬化型 KAL 中强度铝合金

KAL 属铝-镁-铁系合金，其中含铁 0.5%～0.6%、镁 0.17%～0.3%，元素含量随线径粗细和拉制工艺的不同而有所变化。它的制造工艺与硬铝线相同，用连铸连轧法制杆，所以成本较低。有关铝合金杆的焊接问题推荐用电焊而不用冷焊，接头好坏的关键在于焊时要尽量避免或减少氧化，因此，变压器容量要大，时间要短。

KAL 线的膨胀系数与硬铝线相同，通常采用 $23\times10^{-6}℃^{-1}$。KAL 线的条件屈伏极限 $\sigma_{0.2}$%（比硬铝线高 30%以上）为 23～24MPa（硬铝线为 17～18MPa）。KAL 线与 HAL（硬铝线）在 100～350℃的恒温槽中加热 1h，然后在常温下测定它们的抗拉强度和电阻，其等温软化特性如图 3.5-4 所示。由图可以看出：在 150℃以下 KAL 和 HAL 的特性几乎没有什么变化。在150～200℃之间两者的强度都慢慢下降，以后性能产生剧烈的变化，到 300℃左右已完全软化。KAL 线在 200℃加热 1h 后抗拉强度基本上仍可保持规定的数值，从这点上看它的耐热性要比硬铝线稍好些。KAL 线的长时软化特性，试样在 90、100、120℃的恒温槽中加热 1～1000h 后，在空气中冷至常温，并测定其抗张强度。φ4.5mm KAL 线和 HAL 线的长时间加热与抗拉强度及强度变化率的关系如图 3.5-5、图 3.5-6 所示。据试验表明：在 90℃下加热 1000h 后，硬铝线的抗张强度约下降 3%，而 KAL 线则几乎没有软化。加热温度在 100℃以上，能看到抗张强度有所下降，在 100℃时其下降程度约为 1%，比硬铝线在 90℃时的还少。加热温度在 120℃下，硬铝线经 10h 后开始软化，但 KAL 线到 100h 还没有软化。如上所述，从等温软化及长时软化特性上可看出：KAL 线的耐热性比硬铝线好，如果导线连续容许温度取用像硬铝线（90℃）一样，那么显然更是没有问题的。KAL 和 HAL 线的疲劳特性，用中村式疲劳机对 φ4.5mm 的线测定结果表明，KAL 和 HAL 的疲劳强度（10^7）分别为 8MPa 和 62MPa。KAL 的蠕变特性，在 90℃的恒温装置内试样垂直放置，并施加 20%抗拉强度的张力，连续测定试样标距间的长度，由此获得蠕变伸长率。在 1000h 后的蠕变伸长率和平均蠕变速度如表 3.5-9 所示。在 90℃蠕变时 HAL 线蠕变伸长率和蠕变速度都比 KAL 的大，这说明 KAL 线的耐热性比 HAL 线好。在实际的使用条件下，KAL 线的蠕变伸长率是比较小的。对 KAL、HAL 和 IAL（イ号高强度铝合金）线在盐水喷雾、二氧化硫气体腐蚀和气体发生试验的条件下进行耐蚀性对比，其结果如下：

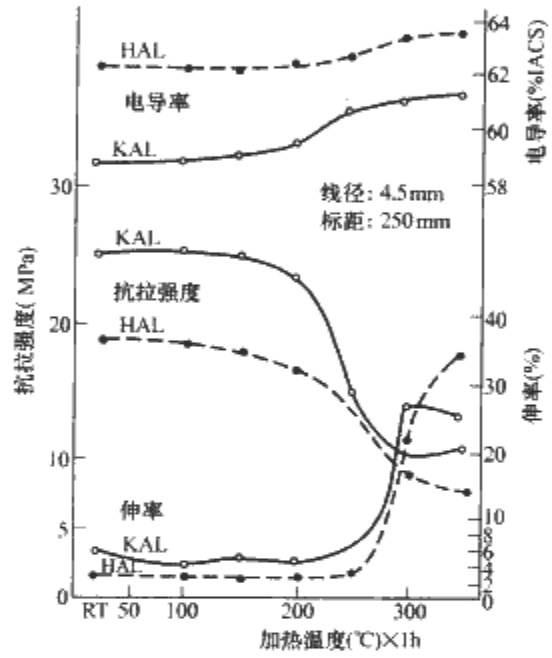


图 3.5-4 KAL 和 HAL 线的等温软化特性

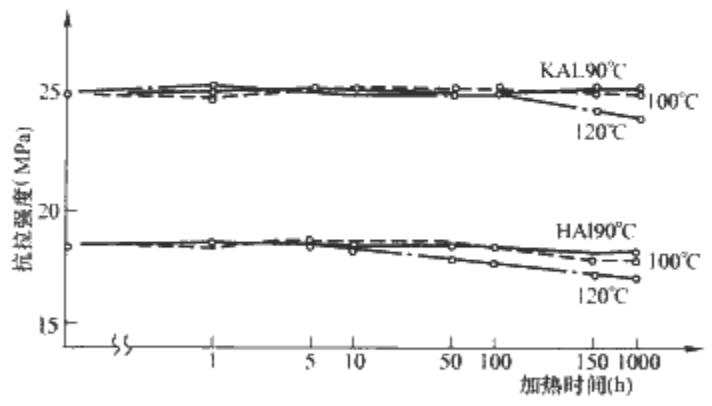


图 3.5-5 加热时间与抗拉强度的关系（试样线径：4.5mm）

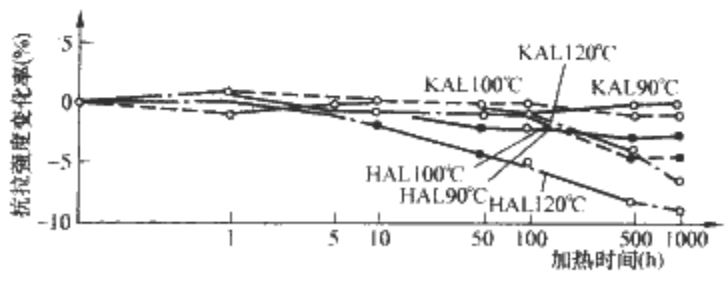


图 3.5-6 加热时间与抗拉强度变化率的关系

$$抗拉强度变化率=\frac{\sigma_0-\sigma_t}{\sigma_0}\times100\ (\%)$$

式中：σ_0 为原始抗拉强度，MPa；σ_t 为 t 时加热后在室温下

的抗拉强度，MPa。

（1）盐水喷雾试验——ϕ4.5mm 的 KAL、HAL 和 IAL 线，用 5%盐水经 60 天连续喷雾试验，腐蚀减量随时间而增加，KAL 和 HAL 线大致相等，但比 IAL 线小，而拉断力、伸长率和扭转等性能在测量误差的范围内看不出有多大的恶化。

（2）二氧化硫气体腐蚀试验——KAL、HAL 和 IAL 线用二氧化硫气体含量为 200×10^{-6}，试验温度 40℃，湿度 95%R.H 以上，经 60 天连续试验。腐蚀减量 KAL 线比 HAL 线大，与 IAL 线相等，但机械性能看不到恶化。

（3）气体发生试验——试样在 20℃的 10%HCl 和 10% NaOH 水溶液中测定发生 50cm³ 的氢气所需的时间。KAL 与 IAL 线基本上趋于一致，但与 HAL 线比在碱性溶液中 KAL 线是好的，而在酸性溶液中是比较差的。

表 3.5-9　KAl 及 HAL（硬铝线）的蠕变特性

线样	应力（MPa）	温度（℃）	1000 小时后的蠕变伸长率（$\times10^{-2}$%）	平均蠕变速度（$\times10^{-5}$%）	
				200～500h	200～1000h
KAL	4.58	90	2.44	1.4	1.1
HAL	3.37	90	3.23	2.4	1.7

注　线样直径为 4.5mm。

4.2　半热处理半加工硬化型中强度铝合金

日本住友电工开发的 Sl—26 中强度铝合金是属 Al—Mg—Si 系的半热处理半加工硬化型的铝合金。这种合金和同样是 Al—Mg—Si 系的热处理型高强度铝合金相比，在热处理加工条件等方面有其不同的特点，所以称之为半热处理半加工硬化型合金，另外在性能方面电导率比 1 号高强度铝合金高，抗拉强度比 5005 中强度加工硬化型铝合金高，但其缺点是成本比较高、生产效率比较低。这是由它的制造工艺所决定的，在制造流程中需要固溶化处理、淬火和时效处理等。

Sl—26 铝合金是具有 Mg_2Si 有效强化析出相的 Al-Mg-Si 系合金，所以由时效硬化而导致材料的硬化，是最理想的强化手段。经研究表明：冷加工与材料的时效硬化性能有关，当含镁量不同时，室温（自然）时效与冷加工对 Al-Mg-Si 系合金时效后的性能影响亦有差异。表 3.5-10 列出了 A、B、C、D 四种不同的热处理工艺条件，图 3.5-7 示出了含镁 0.2%时含硅量与抗拉强度和电导率的关系，图 3.5-8 示出了在含镁 0.32%时，Al-Mg-Si 系合金在室温时效之后进行冷加工，然后又进行人工时效时，能显著地促进时效硬化特性，导电性能和抗拉强度也随之获得改善。

表 3.5-10　不同的热处理工艺条件

工艺	固溶化处理	室温（自然）时效（h）	冷加工（%）	人工时效条件（h）
A	530℃×1.5 h，淬火	0	0	180℃×6
B		0	15	
C		48	0	
D		48	15	

从工业生产的角度考虑，能缩短热处理的时间，也可取得显著时效硬化的效果，才是最合算的。图 3.5-9 示出了添加元素铍，是极为有效的。在时效条件相同的情况下，添加铍的合金，其强度和电导率都是优良的，而且对时效硬化起促进的作用。为此，在取得同样性能的条件，可使时效时间有大幅度的缩短，这是很有利的。

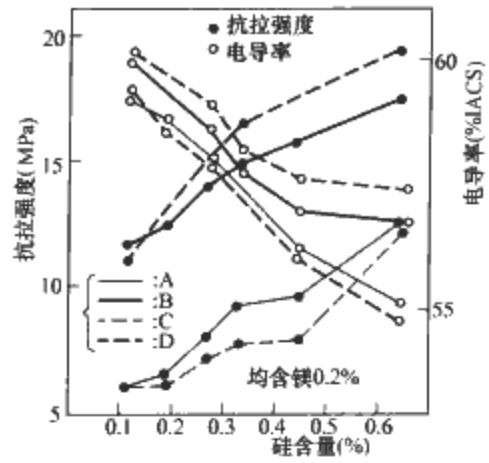


图 3.5-7　在含镁量为 0.2%时，含硅量与抗拉强度和电导率的关系

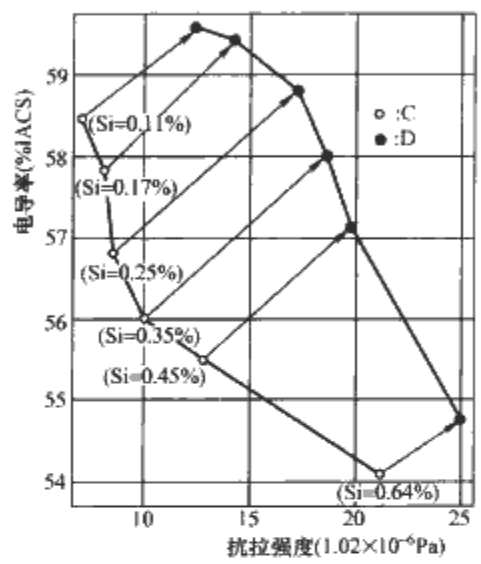


图 3.5-8　在含镁量为 0.32%时，Al-Mg-Si 系合金的时效特性及冷加工的影响

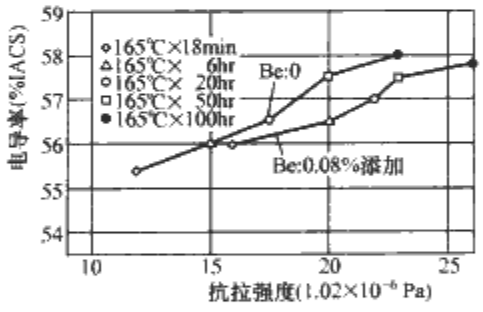


图 3.5-9　铝—0.35%镁—0.35%硅合金的时效特性和添加铍的影响
（固溶化处理：530℃×1.5h）

4.3　中强度铝合金线标准

过去我国没有开发中强度铝合金线，现以日本的中强度铝合金线标准摘要介绍如表 3.5-11 所示。

5　绝缘电线电缆导电线芯、电磁线及细线用铝合金线

绝缘电线电缆导电线芯、电磁线及细线对铝合金的性能要求基本相同，仅有个别的产品有些特殊要求，只需在生产时调整某些工艺参数即可达到。

过去，国外对这方面铝合金的研究和生产起步较晚，我国没有开发和应用，但后来国外相继开发了许多性能优良的新品种，例如这类铝合金的牌号有：Cond—Al、Aluflex、VUK—33E、Trip—E、Super—T、CM71、X8076、Ductalex、DS—Al、HID—Al、FA103、Sl—16 等。每种合金性能有所偏重，如 DS—Al、HID—Al 柔软性较好，Ductalex 抗蠕变性和连接性能较好，此类合金的主要性能如表 3.5-12 所示。

表 3.5-11 中强度铝合金线（KAL）标准（JCS 363）

线径 (mm)	线径公差 (mm)	抗拉强度 (0.1MPa)	伸长率 (%)	20℃电导率 (%IACS)	参考			
					面积 (mm)	单位质量 (g/m)	拉断力 (N)	20℃电阻 (Ω/km)
		以上	以上	以上				
2.3	±0.03	252	1.5	58.0	4.155	11.22	1047	7.15
2.6	—	248	1.5	—	5.309	14.33	1317	5.60
2.9	—	245	1.6	—	6.605	17.83	1618	4.50
3.2	±0.04	241	1.7	—	8.042	21.71	1938	3.70
3.5	—	241	1.7	—	9.621	25.98	2319	3.09
3.7	—	241	1.8	—	10.75	29.03	2591	2.77
3.8	—	241	1.8	—	11.34	30.62	2733	2.62
4.0	—	238	1.9	—	12.57	33.94	2992	2.36
4.2	—	225	2.0	—	13.85	37.40	3116	2.15
4.4	—	225	2.0	—	15.21	41.07	3422	1.95
4.5	—	225	2.0	—	15.90	42.93	3578	1.87
4.8	—	225	2.0	—	18.10	48.87	4072	1.64
5.0	—	225	2.0	—	19.64	53.03	4419	1.51

表 3.5-12 绝缘电线电缆导电线芯、电磁线及细线用铝合金线的主要性能

合金牌号	合金系列	线径 (mm)	状态	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	伸长率 (%)	电导率 (%IACS)
导电用铝 (EC)	铝	0.5	软	8	—	20	63
			半软	10～15	—	3	62.5
MSAL	Al-Mg-Fe-Cu-Sb	0.5	软	13.0	6.5	15.0	61
			1/4 硬	15.0	13.0	6.0	61
			1/8 硬	18.0	16.0	1.5	60.5
SI-16	Al-Mg-Si-Fe	0.6	软	11.5	—	20	62.0
			1/4 硬	13	—	5	61.8
FA-103	Al-Ni-Fe	0.5	软	12	—	24	61.4
			1/2 硬	13.5	—	8	61.3
HiD-AL		0.5	1/2 硬	13.3	—	8.2	61.1
KAL-1	Al-Fe-Cu		1/4 硬	11～13	—	12～20	61.3
FS-AL	Al-Mg-Fe-Be	0.95		13.1	10.5	15	62.5
DS-At		0.5	软	11.8	6.5	25	61.9
			1/8 硬	13.1	11.8	9	61.8
DS-AL	Al-Fe	0.5	软	12.3	6.8	26	60.7
			1/8 硬	13.6	12.1	8	60.6
Triple-E	Al-Fe	1.6	软	9.1		27.9	62.9
			1/2 硬	10.9		19.0	62.6
			3/4 硬	12.7		10.0	62.1
		2.05	1/2 硬	12		17	62.3
Super-T	Al-Fe-Co		半软	16.9	—	10	60.6
			软	13.3	—	25	61.1
CK-76	Al-Fe-Mg	—	半软	14.0	—	7	60 以上
X8076	Al-Mg-Fe	2.6	软	11.2	6.3	22	61.2
		2.05	1/4 硬	14	12	15.0	61.3
CM-71	Al-Mg-Cu-Fe	2.05	软	12.5	8.1	11.8	60.6
			1/4 硬	14.4	9.2	9.2	60.1
Ductalex	Al-Cu-Mg-Be	0.5		>12.2		>10	>61
Cond-Al	Al-Fe-Mg-Si		热处理型	15.4		21.2	58.5
VUK-33E	Al-Mg-Si-Fe		软	10.5～11.5	4.2～5.2	22～25	>55.5
Aluflex	Al-Mg		1/2 硬	15～18		>8	>55.6

绝缘电线电缆导电线芯的以铝节铜，对于大规格的一般采用硬铝线，小规格的则用半软化铝线。但是，随着以铝节铜范围的扩大，半软化铝线就不足以应付了。根据布电线、电力电缆、通信电缆、电磁线和接线等使用场合的不同，不仅要求采用细线和特细线，同时在性能上，诸如对柔软性、强度、延伸率、高温蠕变性能和连接性能等方面也提出了更高的要求。其中特别是蠕变特性和连接特性，对用铝合金线代替软铜线时显得尤为重要。为了满足这些要求，国外出现了不少新牌号的铝合金线，例如“CM71”、“Triple—E”、“Super T”、“CK76”和“MS—AL”等。之所以要发展这些新型合金，主要是因为“5005”合金电导率比较低；像“6201”之类的热处理合金在高温下长期使用时，电阻又不稳定。

“Triple—E”和“Super T”是美国南方线材公司生产的两种铝合金。“Triple—E”属于铝—铁系合金，其中含铁 0.65%。经研究表明，这种合金的性能不仅与含铁量有关，而且与加工方法也有密切的关系。加入少量的铁可增加抗张强度和屈伏极限，不会恶化电导率和延伸率；如果采用“SCR”法（南方线材公司连铸连轧法）轧成的 ϕ9.5mm 杆，再拉到直径为 0.46mm 的线，可获得较好的电导率、热稳定性、冷加工性能、抗拉强度和延展性。究其原因，经电子显微镜观察证明，用连铸连轧法生产时，有些铁以 Al_3Fe 的形式析出，但有些铁由于快速的冷却过程而仍保持在固溶状态，这样造成了一种过饱和的固溶基体。因此，这些被破碎了的、并经轧制过程分散了的细小组织可抑制粗大组织的形成，所以就改善了一般铝－铁二元合金用非连铸连轧方法生产时会形成粗大组织的毛病。

Super—T 合金是在铝铁系中加入第三元素钴。它也用 SCR 连铸连轧法生产，但抗拉强度和屈伏极限等优于 triple-E。它的硬线和软线的抗拉强度可分别达到 248.0MPa 和 130MPa，屈伏极限为 103～117MPa（ϕ0.51～0.81mm 的细线），电导率可达 61%IACS。这点对通信电缆而言，因为所用的导线比较细，这样可大大地减少电缆在生产过程中线径被拉细的现象，以防止在电气上的不对称性。此外，它的耐热性在 150℃时，抗拉强度达 245MPa，在 210℃下加热 2000h 后的抗拉强度为 134MPa。这样的耐热性可与高导电（60%IACS）耐热铝合金线相媲美。因此它不仅可在通信电缆、电力变压器（即使在 200℃以上也可连续运行）、电磁线、航空线等产品中使用，还可在架空线路上作耐热铝合金线使用。

1970 年研制成的“CM71”合金，其蠕变性能和松弛性能比“Triple-E”和“CK76”又有了提高，这也是“CM71”所改进的主要性能。

电磁线用铝合金，国外研究、开发较多的是中小型电机绕组用铝合金，因为电机绕组的绕制和镶嵌都采用高速自动化设备，在镶嵌时铝线要产生 10%的延伸，容易被拉断、拉细或过度变形，而细铝线尤甚。铝合金的屈伏强度为纯铝的 2 倍，不仅克服了这些缺点，而且加工性能亦较好，甚至可达到几乎与铜线相等的加工性能，涂漆性能亦与纯铝相同。电磁线用铝合金的牌号有：X8076、Ductalex、FS—AL、SI—16、HID—AL、MSAL 和 DS—AL 等。

通信电缆用铝合金，以前通信电缆用铝采用 ϕ0.5～0.65mm 和 0.8mm 左右的铝线，ϕ0.5～0.65mm 细铝线在生产过程中易断线和拉细，尤其在采用拉线—退火—挤包绝缘连续高速生产时更为突出，为了保证质量，必需用强度大和延伸率高，又能进行连续退火的铝合金。采用不同的退火方式，对有的合金的最终性能，尤其是电导率有很大的影响。有的合金连续退火能使电导率明显下降，例如，对于 SI—26 和 Al—Mg—Si—Fe 系合金，连续退火比批式退火的电导率要低 4.5%和 2.6%IACS。研究表明，铝合金在连续退火中，合金相变是很少的，添加的固溶元素几乎是不析出的，合金成分中的 Si 对电阻率影响较大，而 Mg、Ni、Be 等影响较小，因此，此类合金对 Si 的控制较严。

现以日本住友电工研发的软线用 SI—16 铝合金线作进一步的介绍。电气装备用电线、通信电缆及室内配电线等，由于工作性质和要求性能的不同，一般采用半软或软的导线。对于软导线，要求采用强度、耐热性、耐蚀性、弯曲性、蠕变特性、接续性和导电性都较优越的铝合金制成。住友电工根据上述要求研发了 SI—16 铝合金。

5.1　铝合金线的抗拉强度和伸长率

图 3.5-10 为电工用铝 EC—Al 和 SI—16 铝合金的伸长率和抗拉强度的关系。就同一种材料来说，可以通过不同的软化而获得适当的强度，如将强度提高，伸长率就大为下降。因而，在同时要求较好的伸长率和强度的情况下，就非使用合金材料不可。从这一点出发，将导电性能降低并控制在最小限度，而又使强度和延伸率均有所改善，这就是研发 SI—16 的目的之一。表 3.5-13 和表 3.5-14 示出了 EC—Al、SI—16、铜包铝及铜线的技术参数和 EC—Al 与 SI—16 铝合金线的技术参数。

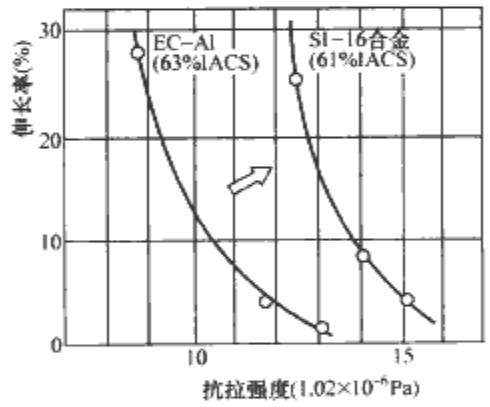


图 3.5-10　抗拉强度和伸长率的关系

表 3.5-13　　EC—Al、SI—16、铜包铝和铜线的技术参数(ϕ2.0mm)

材料	状态	抗拉强度(MPa)	0.2%屈伏极限(MPa)	伸长率(%)	电导率(%IACS)	弯曲试验(360°/次)	弯曲值①
EC—Al	软	8.6	4.4	30	63.4	38	28
EC—Al	1/4 硬	9.7	8.9	13	63.3	—	—
EC—Al	半硬	11.5	11.0	4	62.9	31	18
EC—Al	硬	21.7	18.0	1.7	62.0	15	11
SI—16	软	12.5	8.0	27	60.8	47	29
铜包铝线	软	10.9	7.5	16	68.5	32	21
铜	软	24.5	10.0	38	101.0	56	76

① 系指 180°/次，R=20mm，荷重=461g 时的值。

表 3.5-14 EC-Al 和 SI-16 铝合金线的技术参数

材料	调质	热处理方法	线径 (mm)	抗拉强度 (MPa)	0.2%屈伏极限 (MPa)	伸长率 (%)	电导率 (%IACS)	弯曲试验次数		
								自由弯曲	反复弯曲	自倍径卷绕
EC—Al	软	连续	0.8	9.8	5	32	62.9	55	25	6
EC—Al	1/4 硬	连续	0.8	10.9	8	12.7	62.5	35	15	6
EC—Al	硬	—	0.8	27.0	26	1.8	62.0	2	5	0
SI—16	软	连续	0.6	11.5	8	25	61.0	—	—	—
SI—16	1/4 硬	连续	0.6	14	12	8	60.8	90	30	8
SI—16	硬	—	0.6	32	31	1	58.5	—	—	—
SI—16	半硬	分批	0.6	14	12	8	61.0	—	—	—
SI—16	软	分批	0.6	12.5	12.5	25	61.0	—	—	—

注 1. 自由弯曲系在距卡盘 80mm 处将铝合金线拉向卡盘一方，再向相反方向移近卡盘，往返为一次。
2. 反复弯曲是以 1R 为半径，将 100R 长的铝合金线反复弯曲 180°作为一次。
3. 自倍径卷绕是将导线在自身直径圆棒上先紧密正绕 5 圈，再紧密反绕 5 次，这样作为一次。

5.2 耐热性

在高温加热并保持 1h 后，再在室温下测定 SI—16 合金和 EC—Al 线的强度与伸长率。结果如图 3.5-11、图 3.15-12 和图 3.5-13 所示。由图中可以看出：SI—16 和 EC—Al 作为软态材料，其软化特性和长时间加热特性都是比较稳定的，而在高温下的抗拉强度则是 SI-16 较好。

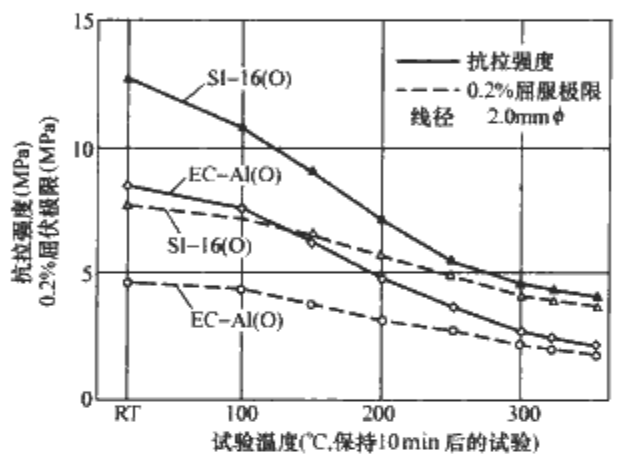


图 3.5-13 高温抗拉强度
(SI—16 和 EC—Al 试样均为软态)

5.3 振动疲劳特性

耐振动疲劳性能在实用上是一个重要的技术参数。图 3.5-14 为振动疲劳试验的方法。图 3.5-15 为振动疲劳的测试结果。有绝缘被复的电线，其耐振疲劳性能比裸导线有所提高。SI—16 铝合金线的疲劳强度在软铜线和 EC—Al 之间。

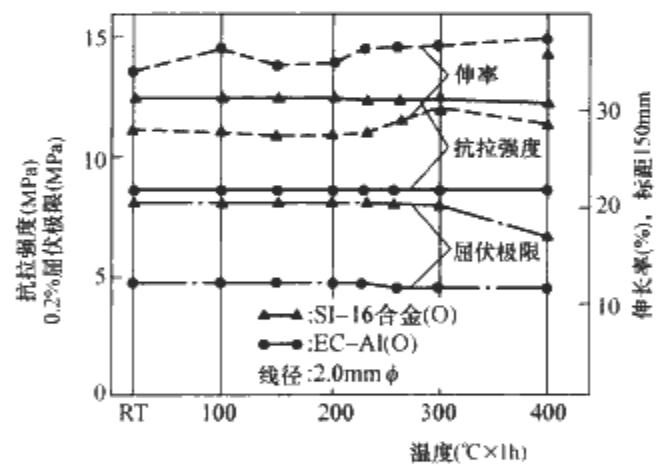


图 3.5-11 软化特性
(SI—16 和 EC—Al 试样均为软态)

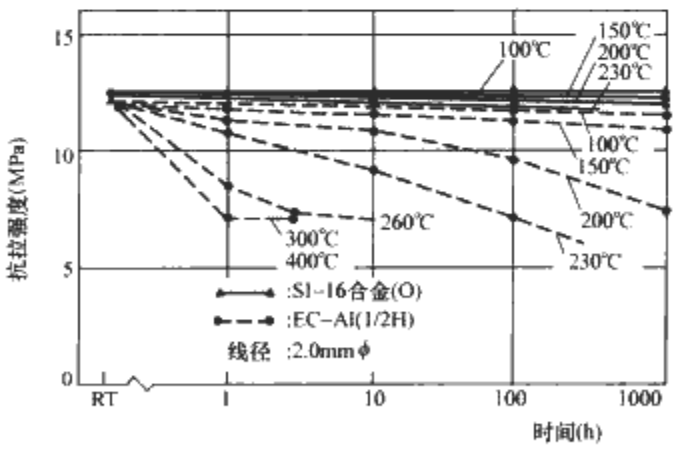


图 3.5-12 长时间加热特性
(SI 16 为软态、EC—Al 为半软态)

5.4 蠕变特性和松弛特性

在运行情况下，电磁力会在导线上形成一定的应力负荷。因而，在一定负荷下的导线接头，要有好的蠕变特性和可靠性是很重要的。几种线材在室温下的蠕变特性如图 3.5-16 所示。在 100℃时的蠕变特性如图 3.5-17 所示。松弛振荡试验方式如图 3.5-18 所示。几种线材的松弛振荡特性如图 3.5-19。由图的曲线可以看出：在相同的应力条件下，相同的线材，但状态不同时，较硬的线材，其抗拉蠕变特性优良。当线材的状态相同时，SI—16 合金的这项性能远较 EC—Al 优越。采用螺栓紧固等方法，在微小的变形下形成导线接头部分时，接触电阻取决于接头部位的压力，而松弛振荡特性，对于接头性能是有重要影响的。线材相同时，状态较软的线材，其松弛振荡特性较优。SI—16 合金线的特性与软铜线相近似，预期其接续性是良好的。

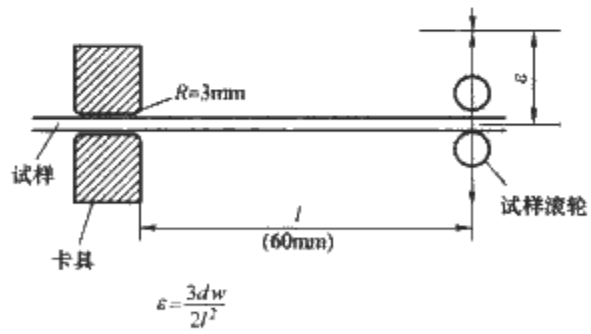


图 3.5-14 振动疲劳试验机
w—半振幅；d—试样直径；l—试样长度；ε—偏心距

5.5 接续性能

在软铜线范围内的以铝节铜进展较慢，其主要原因在于铝导线接头的稳定性和可靠性都比铜线差。采用铝合金线是解决这个问题的手段之一。影响导线接续性能的主要因素是

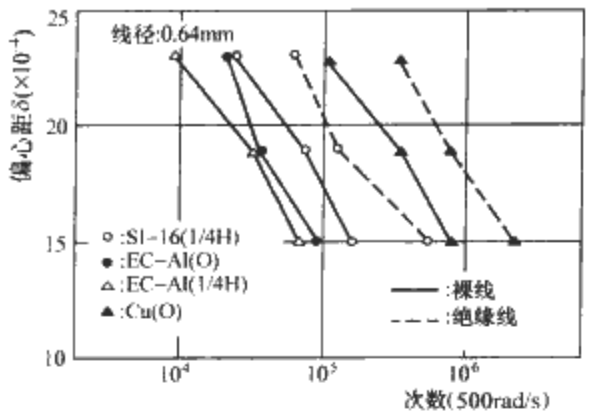


图 3.5-15　振动疲劳特性

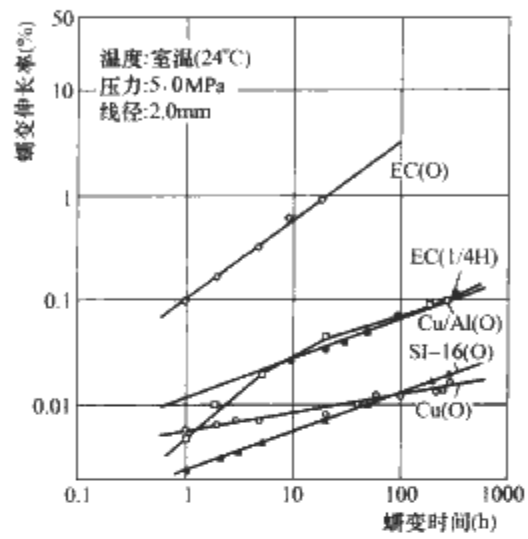


图 3.5-16　室温下的蠕变特性

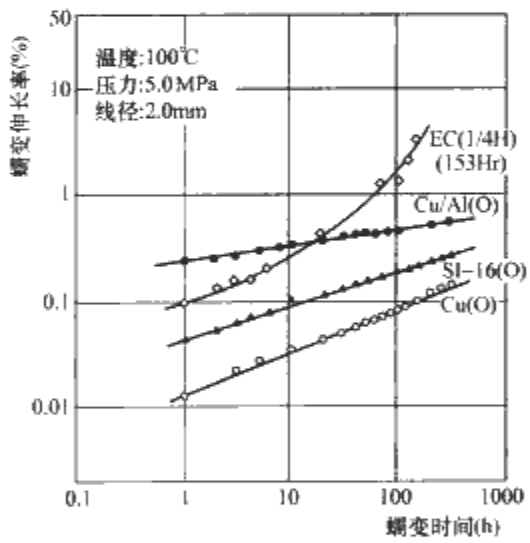


图 3.5-17　100℃下的蠕变特性

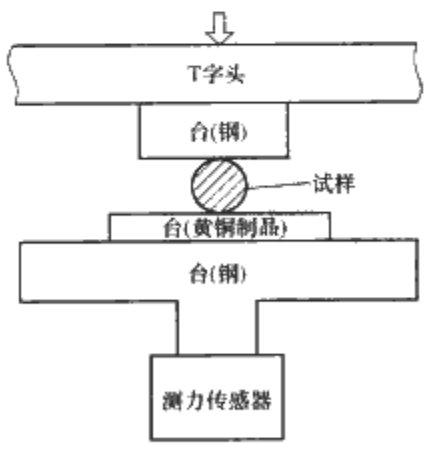


图 3.5-18　松弛振荡试验方式

氧化膜的产生及耐松弛的特性。氧化膜的问题，想用合金化的方法来改善接续性能是困难的，而耐松弛振荡特性则是可能与铜相近的。为此，对各种漆包线线圈的接头进行了热循环试验，其结果如图 3.5-20 所示。各种导线用作室内配线时，对接续的评价如表 3.5-15 所示。可以看出：接续性与耐松弛振荡特性有密切的关系。

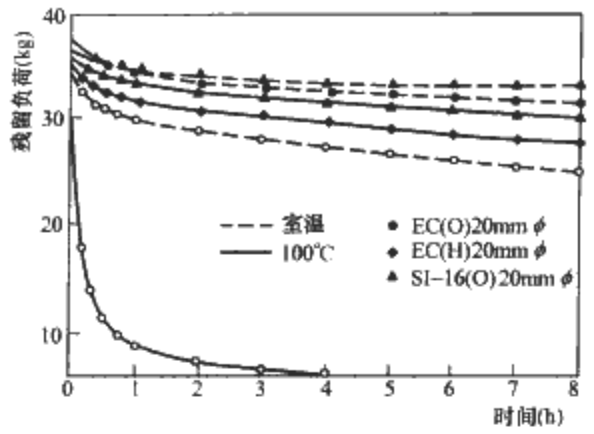


图 3.5-19　松弛振荡特性

EC—软线，线径 2.0mm；EC—硬线，线径 2.0mm；SI—16—软线，线径 2.0mm

5.6　耐蚀性能

室内配电线和通信电缆等的使用环境较为良好，其耐蚀性不需特别考虑，然而电磁线等各种电气装备用电线，必须认真考虑其耐蚀性。在用 5%食盐溶液连续喷雾，观察抗拉强度残存率与连续喷雾时间的关系后可知，SI—16 及 EC—Al 合金的耐蚀性能基本上是相等的。综上所述，SI—16 合金线在机械性能和接续性能等方面已较 EC—Al 电工铝线有了较大的改进，因此，该种合金线在通信电缆及电磁线方面曾进入过实际的使用。

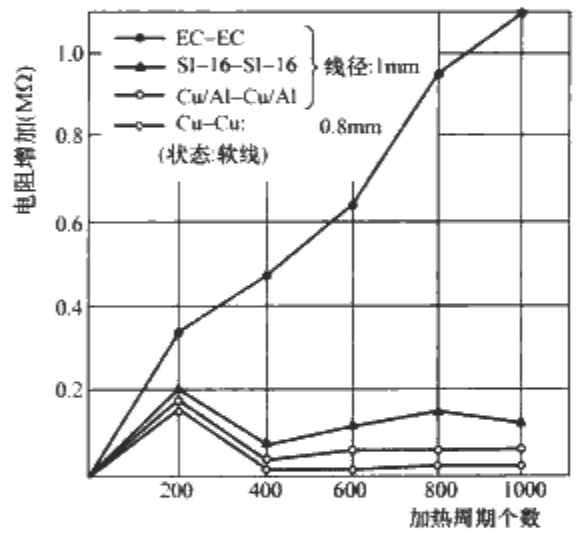


图 3.5-20　各种漆包线的接头加热周期试验结果

（AMP 连接管，电流 20A，3/4h 通电，1/4h 停止为一个周期）试样分别为 EC 与 EC 线、SI—16 与 SI—16 线、铜包铝与铜包铝线和铜与铜线相接

表 3.5-15　　室内配电线接续性评价结果

接续方法		配线器具	夹板紧固 (9.8×10^{-3}N·m)		交叉绑扎连续 (9.8×10^{-3}N·m)	
		扭紧力矩	7	12	7	12
线材	EC 硬	φ2.0	* * *	* * *	* * *	* * ×
	EC 半硬	φ2.0	* * *	* * ×	○○○	○○○
	EC 软	φ2.0	* * *	× × ×	○○○	○○○
	SI-16 软	φ2.0	* * *	○○○	○○○	○○○
	Cu 软	φ1.6	○○○	○○○	○○○	○○○

注　通过电流 40A，45min 通电，45min 停止为一个周期。○—2000 周期为合格；×—500 周期以后烧损；* —到 500 周期烧损。

6 耐热铝合金线

在铝中添加少量的锆制成铝合金，可提高其耐热性，而对电导率的影响可控制在最小的范围内。这项研究成果始于1950年由美国首先提出。在日本，这种耐热铝合金受到导线设计人员广泛的重视，从1960年起便进行了系统的研究和开发。耐热铝合金导线主要在新建高压和超高压架空线路上用作大容量导线、大电流地线、大跨越导线和变电站内部用的大电流母线。此外，在老的架空线路改造亦使用耐热铝合金导线，可在不改变铁塔高度，不另选线路走廊的条件下，只需更换导线，就可使线路容量增加50%以上，从而获得很好的技术经济效果。目前，耐热铝合金线已发展到了具有高导电、高强度、高耐热和特耐热的水平。在实际应用中使用最多的是高导电（60%IACS）耐热铝合金线和高强度（电导率55%IACS、抗拉强度240MPa左右）耐热铝合金线，而电导率为58%IACS的耐热铝合金在应用中已被淘汰。为了满足大容量导线对耐热铝合金线的需要，现在国际电工委员会（IEC）已制定出《架空导线用耐热铝合金线》的IEC标准。上海电缆研究所在原有开发耐热铝合金线的基础上，近年来又开发了非热处理型高导电（60%IACS）耐热铝合金线和高强度耐热铝合金线。我国对耐热铝合金线的应用，从变电站大电流母线（20世纪80年代，由上海电缆研究所开发的第一代耐热铝合金线，电导率为58%IACS）开始，现已推向在架空线路上应用。耐热铝合金导线不仅在日本已获得广泛的应用，现在也在欧洲和亚洲等地获得应用。

6.1 耐热铝合金线的特性

现以允许连续工作温度为150℃的耐热铝合金为例，对耐热铝合金线的特性进行介绍。

6.1.1 添加锆对铝的影响

通常，采用硬铝线制造的钢芯铝绞线（ACSR）有个缺点，就是因软化温度低而导致耐热性低，其温升规定为70～90℃。但随着用电设备的容量增加及输电线路容量的急剧增大，就要求有耐热性更好的铝合金。经研究表明：锆既能提高铝的再结晶温度，又不太降低其电导率。99.0%的工业纯铝再结晶温度为185℃，而含0.1%Zr的铝—锆合金，其再结晶温为320～330℃，使再结晶温度一下提高了140℃左右。到目前为止，尽管耐热铝合金线品种较多，但从合金系看，仍都属铝-锆系的耐热铝合金。锆在铝中的添加量对电导率和半（1/2）软化温度的影响如图3.5-21所示。铝与锆的状态图如图3.5-22所示。由图可以看出：锆在铝中的最大固溶度为0.28%（在660.5℃下），且存在包晶反应，包晶点的含锆量为0.11%Zr。锆在铝中的固溶度随温度下降而减少（见表3.5-16），在427℃下固溶度降低到0.05%～0.06%Zr。在包晶温度，0.28%锆可以固溶。据推测，在常温下锆将几乎完全不能在溶。锆在铝合金中一般认为具有细化晶粒的作用，但由于细化的效果不如钛，并因在硼存在的条件下，其细化效果不会提高，所以通常不作细化晶粒的手段。含锆0.28%的铝，电导率下降到57.47%IACS。在平衡状态下，当锆含量在1%时，其电导率为54.73%IACS，而硬度和抗拉强度大体上不增加。随着铝中添加锆，抗蠕变性能增加，但改善不明显。当锆在基体上呈细小的析出形式存在时，具有明显的效果，对这种组织，当急冷时迅速淬火，而后高温析出$ZrAl_3$就可形成。$ZrAl_3$从过饱和状态析出时，首先是呈圆颗粒，然后呈条状，时效硬化仅发生在227℃以上。

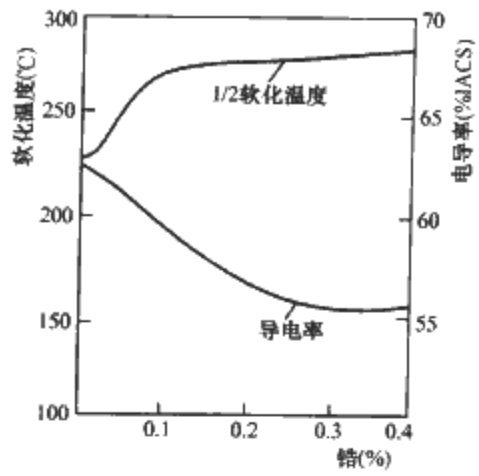


图 3.5-21 铝中添加锆对电导率及软化温度的影响

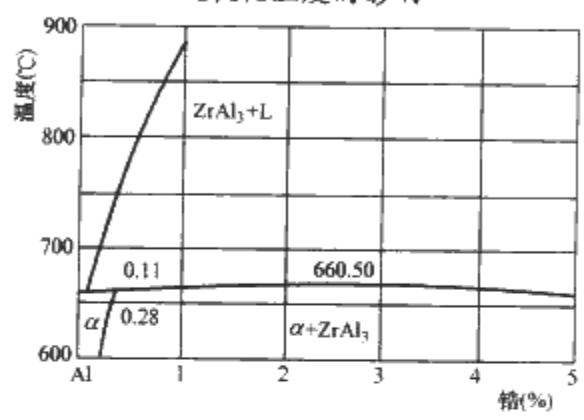


图 3.5-22 铝与锆状态图

表 3.5-16 锆在铝中的固溶度

温度（℃）	锆含量（%）	温度（℃）	锆含量（%）
660.5	0.28	550	0.064
640	0.23	500	0.050
600	0.15		

6.1.2 在常温下的性能

在常温下铝—锆合金线（ϕ4.0mm）与硬铝线相比（见表3.5-17），除导电率比硬铝线低外，其他性能都大致相同。

6.1.3 短时加热的性能变化

如上所述，在常温下，耐热铝合金线的性能虽然与硬铝线相同，但在高温运行情况下，性能差异却相当大。由常温至400℃之间，在各种温度下都加热1h，抗拉强度的变化如图3.5-23所示。耐热铝合金线的软化起始温度是200℃，比硬铝线的软化起始温度高出将近100℃。在高温时的抗拉强度化和弹性模数的变化如图3.5-24和图3.5-25所示。与硬铝线相比，耐热铝合金线的弹性模数较大，即在同一负荷下，耐热铝合金线的伸长较小。

表 3.5-17 在常温下铝—锆合金线与硬铝线的性能对比

性 能	耐热铝合金线	硬铝线
抗拉强度（MPa）	188.2	182.3
伸长率（%），L_0=250mm	2.5	2.0
弹性模数 E（MPa）	68 600	67 620
电导率（%IACS）	60.2	61.8
电阻温度系数（$℃^{-1}$），20℃	0.004 0	0.004 0
疲劳极限（10^7 次）（MPa）	61.70	54.9
线膨胀系数（$\times10^{-6}℃^{-1}$）	23.0	23.0

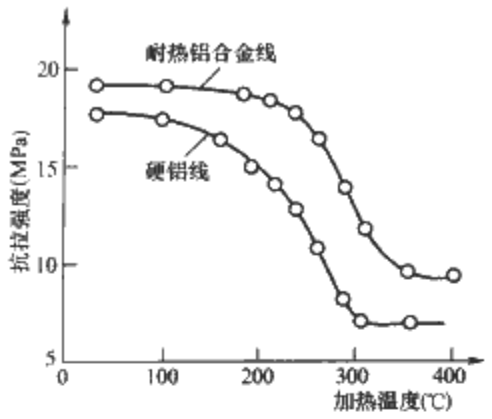


图 3.5-23　加热温度与抗拉强度的变化

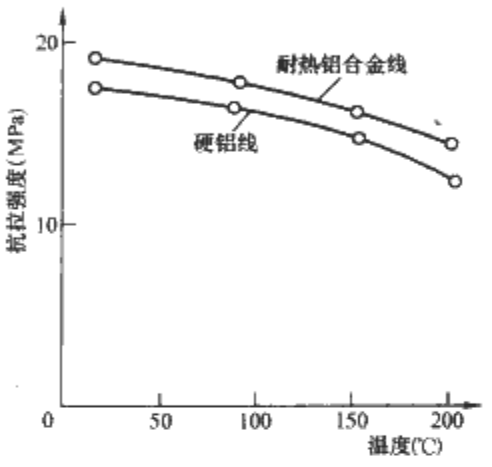


图 3.5-24　高温时抗拉强度的变化

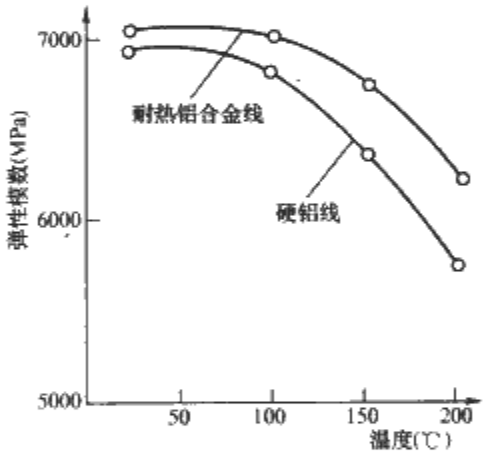


图 3.5-25　高温时弹性模数的变化（保持 30min）

6.1.4　长时加热的性能变化

长时间加热时所引起的抗拉强度的变化如图 3.5-26 所示。抗拉强度降低率如表 3.5-18 所列。这是在恒温油槽中长时间加热之后，在常温状态下进行的抗拉强度试验结果。经过 150℃加热后的耐热铝合金线的抗拉强度降低率，比硬铝线在 90℃下加热后的还要小一些。由此可得出，耐热铝合金的最高使用温度是 150℃或者更高一些。

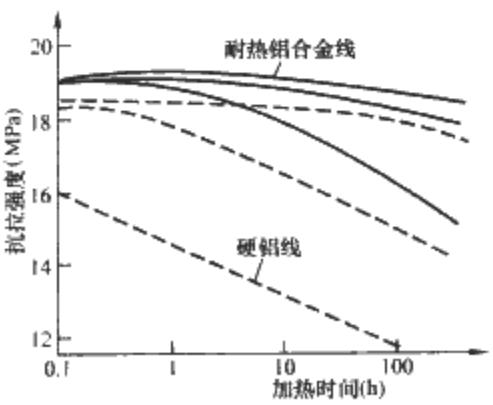


图 3.5-26　长时间加热时抗拉强度的变化

表 3.5-18　　长时间加热后的抗拉强度降低率

种　类	加热温度（℃）	不同加热时间下强度降低率（%）		
		50h	100h	300h
耐热铝合金线	150	1.3	1.8	2.1
	180	2.9	3.9	6.2
	200	12.5	15.6	19.8
硬铝线	90	2.2	2.7	5.4
	150	17.5	19.9	23.7
	200	34.9	37.0	40.3

此外，耐热铝合金线作架空导线使用时，还必须考虑在高温度下的疲劳强度等问题。图 3.5-27 是疲劳强度曲线。疲劳极限数据的比较如表 3.5-19 所列。可以看出，150℃时耐热铝合金线的疲劳极限和 90℃时硬铝线的大致相等。因此，从疲劳强度来说，该铝合金线可在 150℃下使用。

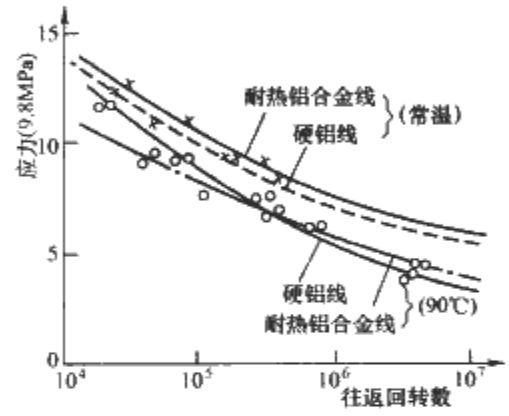


图 3.5-27　疲劳强度曲线（中村式疲劳试验机、试样 φ4mm）

表 3.5-19　　疲劳极限数据对比

种　类	试验温度（℃）	疲劳极限（10^7 次）
耐热铝合金线	室温	61.7
	150℃	36.3
硬铝线	室温	54.9
	90℃	39.2

6.1.5　蠕变性能

架空导线在长时间受拉力后会出现蠕变现象。耐热铝合金线是在高温下使用的线材，因此必须预先弄清其蠕变情况。硬铝线和耐热铝合金线的蠕变速度见表 3.5-20。由蠕变引起的导电率变化见表 3.5-21。蠕变曲线见图 3.5-28。

表 3.5-20　　高温下的蠕变速度

项　目	耐热铝合金线		硬铝线
试验温度（℃）	150	150	90
应力（MPa）	32.9	9.8	9.8
蠕变速度（$\times10^{-3}$%/h）			
100×170h	3.0	1.4	1.5
100～500h	2.0	0.7	0.4
200～1600h	1.5	1.0	—

表 3.5-21　　蠕变引起的电导率变化

项　目	耐热铝合金线		硬铝线
试验温度（℃）	150	150	90
应力（MPa）	9.8	32.9	9.8
试验时间（h）	1800	1800	1020
电导率（%IACS）：蠕变前	58.0	58.0	62.7
蠕变后	59.0	59.1	63.7

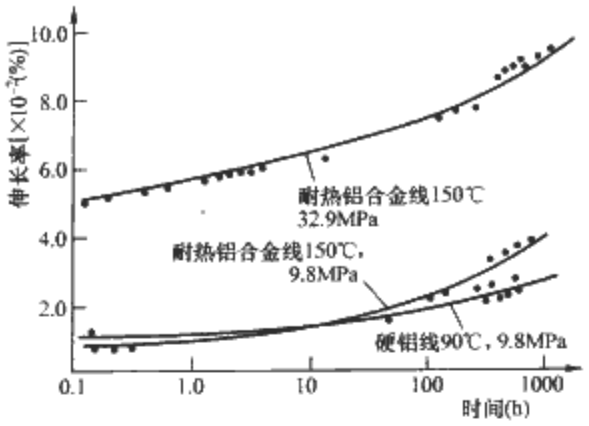


图 3.5-28 蠕变曲线

由表 3.5-20 可看出，150℃时耐热铝合金线的蠕变速度比 90℃时硬铝线的还小，可见铝合金线是优越的。由表 3.5-21 可看出，硬铝线在 90℃、耐热铝合金线在 150℃下经过长时间蠕变试验后，两者的电导率恢复程度是相同的。表 3.5-22 是由蠕变引起的硬度变化，试验条件与表 3.5-21 相同。从蠕变试验后的电导率及硬度变化测定结果来看，耐热铝合金在 150℃时的参数，与硬铝线在 90℃时的大致相同。

表 3.5-22 蠕变引起的硬度变化

项 目	耐热铝合金线		硬铝线
试验温度（℃）	150	150	90
应力（MPa）	9.8	32.9	9.8
试验时间（h）	1800	1800	1020
硬度 H_V（横断面）：蠕变前	45.6	45.6	43.9
蠕变后	44.6	44.2	41.9

在显微镜下观察结晶组织的变化情况，由于耐热铝合金线添加了锆，其结晶组织比硬铝线的要稍为细小一些，而且在蠕变前后并无变化。可以看到硬铝线的组织多边形晶粒比较明显，由此可见，耐热铝合金线的组织恢复是比较慢的。

6.1.6 耐腐蚀性能

使用单纯的气体对铝作腐蚀试验，发现铝的纯度越高，腐蚀现象就越小，而在实际使用中，由于环境中腐蚀性气体复杂程度不同，腐蚀程度因铝纯度而发生的差异，一般很不明显。由此可见，在实验室中进行腐蚀试验，其所得结果，就很难与实际使用状态相符合。在实验室中对铝合金线进行加速腐蚀试验，其结果如图 3.5-29 所示。

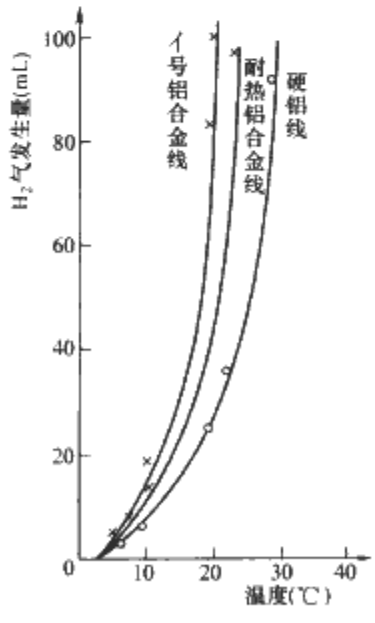


图 3.5-29 1 号高强度 Al-Mg-Si 合金线、硬铝线和耐热铝合金线在 10%HCl 溶液中气体发生量的比较

6.2 耐热铝合金线的制造

根据国际电工委员会公布的《架空导线用耐热铝合金线》标准（IEC 62004—2007—02），耐热铝合金线分为四个型号，即：

AT—1 型——高导电耐热铝合金线。

AT—2 型——高强度（实属中强度）耐热铝合金线。

AT—3 型——高耐热铝合金线。

AT—4 型——特耐热铝合金线。

这四种型号，由于含锆量、添加元素和数量的不同，因此制造工艺也有所不同，现作概要介绍。

耐热铝合金线的制造工艺有关单位和公司均属技术保密范畴，因而国际电工委员会在制订架空导线用耐热铝合金线的标准时也未涉及化学成分和有关的工艺要求。为此，在这里只能作概要的介绍。制造工艺流程如图 3.5-30 所示。

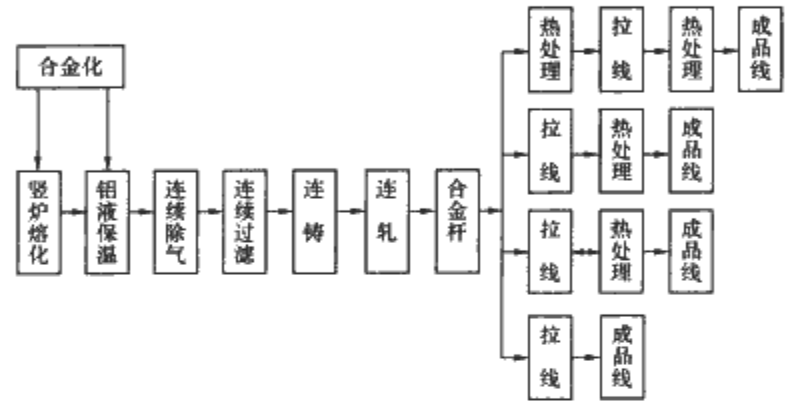


图 3.5-30 耐热铝合金线制造工艺流程

耐热铝合金线的成分，随着耐热铝合金线型号的不同，加入的元素及其加入量、加工及热处理工艺也有所不同，但加入元素及其主要作用大致可归纳如下：

锆——提高铝—锆合金的再结晶温度，增加耐热性。锆含量与电导率、再结晶温度的关系，见图 3.5-31 和图 3.5-32。

铁——调节抗拉强度、可铸性和耐热性。锆加铁的含量与调节电导率和耐热性有关。

铜——调节抗拉强度、电导率和耐热性。

硅——促进 Al_3Zr 的析出，提高抗拉强度。如硅加入量过多，对电导率有恶劣影响，并铸条易产生缺陷。

铍——微量铍的加入可缩短热处理时间，通过合适的热处理可使耐热性明显上升。

钼——在高抗拉强度的水平下，可有效改善耐热性，加钼过量电导率下降。

钙——在高抗拉强度的水平下，可改善耐热性，且不明显降低电导率。

锑——锑加入铝中可改善铝的耐热性。

硼——硼与锆形成化合物，对失去耐热性有影响。

钛——在高温浇铸下具有抑制铸造缺陷和结晶细化剂的作用。在铝锭中钛和钒往往含量较高地同时存在，钒与锆的结合会造成锆的有效量降低。

镁——在耐热铝合金中，随着含硅量的增加，则电导率明显下降，为此要加入 Fe、Mg、Si 等第三元素进行调节，并通过适当的热处理，以满足耐热性和电导率的要求，但镁加入量过多则明显降低耐热性。

锶（Sr）——可防止由于高温浇铸引起的铸条开裂，获得细化的铸条组织，在拉线时不易断线。

钪（Sc，属稀土元素）——在高温浇铸下可起到细化晶粒、防止铸造缺陷的作用，由此可减少拉丝断线的现象。并通过适当的热处理，使 Al_3Zr、Al_3Sc 及 Al_3（Zr、Sc）在基

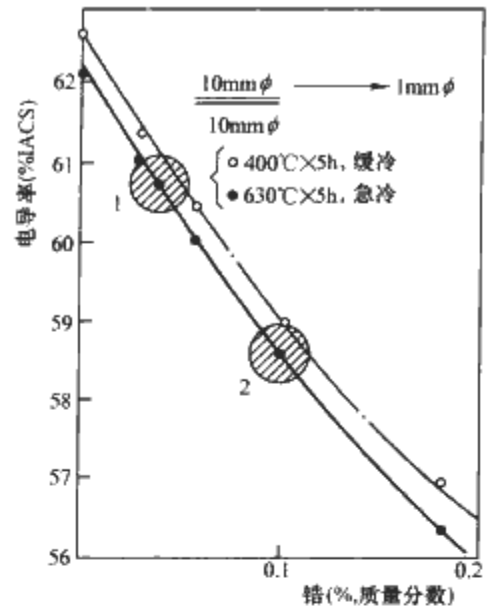


图 3.5-31　锆含量与电导率的关系

1—电导率 60%IACS，使用温度达 180℃的高导电耐热铝合金线；
2—电导率 58%IACS，最高工作温度 230℃的特耐热铝合金线

图 3.5-32　锆含量与再结晶温度的关系

1—电导率 60%IACS，使用温度达 180℃的高导电耐热铝合金线；
2—电导率 58%IACS，最高工作温度 230℃的特耐热铝合金线；
3—电导率 58%IACS 的耐热铝合金线

体上析出，使加工组织稳定化，由此在电导率不低的情况下，有较好的耐热性和抗拉强度。

钇（Y，属稀土元素）——在铝—锆合金中，适当的工艺条件下加入钇可起到不降低或少降低电导率的作用，并改善耐热性。99.99%高纯铝加入添加元素对电导率和再结晶温度的影响见图 3.5-33 和图 3.5-34。

铒（Er，属稀土元素）——铒与钇的作用相似，在铝—锆合金中可起到改善电导率和耐热性（见图 3.5-33 和图 3.5-34）。

制造耐热铝合金杆的关键在连续浇铸。随着合金化铝液浇铸温度的增加，连续浇铸铸条的缺陷将有可能增加，这将影响连轧杆的质量和拉线时断线的增加。连铸连轧热处理型的耐热铝合金杆，实际上是把添加元素的固溶和析出放在一个工序上来完成。因此，这种杆的组织将直接影响以后的加工工艺、热处理和成品线的性能。

耐热铝合金杆的拉线—热处理或热处理—拉线—再热处理或拉线—热处理—拉线—再热处理或只拉线，不热处理，直达成品线的性能要求，其目的在于要控制组织和使 Al_3Zr 等颗粒在基体上充分析出和弥散分布，如果杆或线中的析出物形成条状甚至块状，那将影响成品线的最终技术性能，由此必须调整成分、加工和热处理工艺。当然，制造耐热铝合金线最好的方法是只拉线，不热处理。这样可省时、省工和

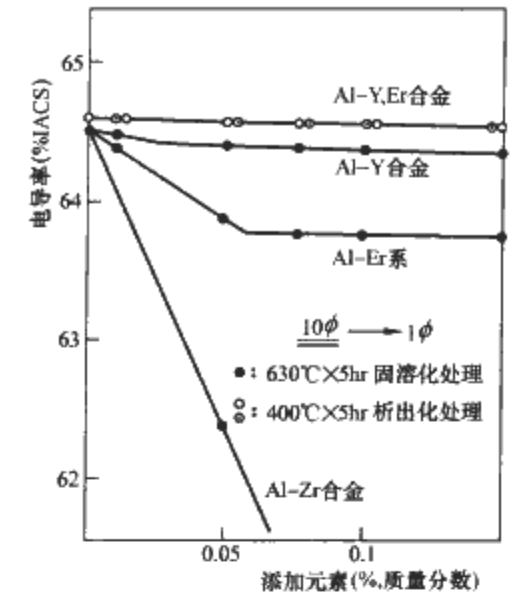


图 3.5-33　在高纯铝（99.99%）中加入添加元素对电导率的影响

图 3.5-34　在高纯铝（99.99%）中加入添加元素对再结晶温度的影响

成本最低，而且性能又可完全符合用户和标准的要求。但事实上如果合金的成分和工艺控制不良，不用热处理往往成品线性能达不到要求或不稳定。尤其是热处理型的、耐热性要求更高的耐热铝合金，随着含锆量的增加，在目前国内外的技术水平下，不用热处理就可达到国际电工委员会“架空导线用耐热铝合金线”的标准或先进工业国同类产品的标准水平还做不到。

6.3　耐热铝合金线的标准和性能

6.3.1　国际电工委员会架空导线用耐热铝合金线标准

这个标准适用于架空线路用的、在导线绞制以前的耐热铝合金（单）线。在标准中规定了各种直径线的机械、电气和耐热性能。标准规定了四种耐热等级的耐热铝合金线的型号，即 AT1（最高允许连续工作温度 150℃的高导电耐热铝合金线）、AT2（最高允许连续工作温度 150℃的高强度耐热铝合金线）、AT3（最高允许连续温度 210℃的高耐热铝合金线）和 AT4（最高允许连续工作温度 230℃的特耐热铝合金线）。

各种型号耐热铝合金线的密度、40 年允许连续工作温度、400h 允许连续工作温度、线膨胀系数和在 20℃下的电阻温度系数如表 3.5-23 所示。

各种型号耐热铝合金线的直径及其公差如表 3.5-24 所示。

各种型号耐热铝合金线的抗拉强度和伸长率如表 3.5-25 所示。

表 3.5-23 耐热铝合金线的参数

型 号	AT1	AT2	AT3	AT4
密度，在 20℃下(g/cm³)	2.703	2.703	2.703	2.703
40 年允许连续工作温度(℃)	150	150	210	230
400h 允许连续工作温度(℃)	180	180	240	310
线膨胀系数(℃⁻¹)	23×10^{-6}	23×10^{-6}	23×10^{-6}	23×10^{-6}
电阻温度系数，在 20℃下(℃⁻¹)	0.004 0	0.003 6	0.004 0	0.003 8

表 3.5-24 线径及其公差

标称直径		公 差
以上(mm)	到和包括(mm)	
—	3.00	±0.03mm
3.00	—	±1%标称直径

表 3.5-25 绞合以前线的抗拉强度和伸长率

型号	标称直径(mm)		最小抗拉强度(MPa)	最小伸长率(%)
	以 上	到和包括		
AT1	—	2.60①	169	1.5
	2.60	2.90	166	1.6
	2.90	3.50	162	1.7
	3.50	3.80		1.8
	3.80	4.00	159	1.9
	4.00	4.50①		2.0
AT2	—	2.60①	248	1.5
	2.60	2.90	245	1.6
	2.90	3.50	241	1.7
	3.50	3.80		1.8
	3.80	4.00	238	1.9
	4.00	4.50①	225	2.0
AT3	—	2.30①	176	1.5
	2.30	2.60	169	
	2.60	2.90	166	1.6
	2.90	3.50	162	1.7
	3.50	3.80		1.8
	3.80	4.00	159	1.9
	4.00	4.50①		2.0
AT4	—	2.60①	169	1.5
	2.60	2.90	165	1.6
	2.90	3.50	162	1.7
	3.50	3.80		1.8
	3.80	4.00	159	1.9
	4.00	4.50①		2.0

① 标称直径 2.60mm 以下或 4.50 以上，其性能的要求应有供、需双方商定。

各种型号耐热铝合金线的电阻率（电导率）如表 3.5-26 所示。

各种型号耐热铝合金线的耐热性能以表 3.5-27 所规定的加热温度及其温度公差和加热持续时间，对线加热后的抗拉强度的残留率进行确认。残留抗拉强度率的计算应按在室温下对加热前测定的原始值与加热后在室温下测定的数值相比，其结果应不小于 90%。

表 3.5-26 耐热铝合金线的电阻率（电导率）

型 号	AT1	AT2	AT3	AT4
20℃下的最大电阻率（Ω·mm²/m） （电导率%IACS）	28.735 (60.0)	31.347 (55.0)	28.735 (60.0)	29.726 (58.0)

表 3.5-27 确认耐热性能的加热温度和持续时间

持续时间	温 度	AT1	AT2	AT3	AT4
1h	加热温度（℃）	230	230	280	400
	温度公差（℃）	+5 −3	+5 −3	+5 −3	+10 −6
400h	加热温度（℃）	180	180	240	310
	温度公差（℃）	+10 −6	+10 −6	+10 −6	+10 −6

耐热铝合金线的接头，耐热铝合金线在最后拉制以前可以进行接头。接头可用电阻对焊、电阻对焊—冷镦粗焊和冷压焊进行。在规定的成品线单元重量、单元数所占的百分数下，成品线可以允许有一个接头。如果用户要求，生产厂应证明成品线接头的抗拉强度不小于 130MPa，而且在成品线中含有所做的一个接头的单元应能清楚地辨认。

耐热铝合金线要经受卷绕试验，线应围绕自身的直径卷绕 8 圈，并不断。卷绕速度应不大于 60 次/min。对在绞合以前非圆形的型线，试验应在成型以前的圆线上进行。

6.3.2 高导电（60%IACS）耐热铝合金线的性能

2002 年上海电缆研究所与江门市新会三新电工器材有限公司合作，在原有 60%IACS 耐热铝合金线的基础上进行了工艺、技术改进，并试制了 NRLH（60% IACS）GJ—120/20、GJ—185/30 和 GJ 400/35 三种规格的铝—锆—钇系，非热处理型的高导电（60%IACS）耐热铝合金导线，GJ—400/35 经上海电缆研究所检测全部合格。该成果已于 2003 年由广东省机械行业协会和广东省广电集团有限公司受中国机械工业联合会和中国南方电网公司的委托，组织产品鉴定，并获得通过。NRLH（60%IACS）GJ400/35 导线的主要试验结果示于表 3.5-28、表 3.5-29。

表 3.5-28 导线结构及耐热铝合金线和镀锌钢线的性能

耐热铝合金线	性能	镀锌钢线	性能
抗拉强度（MPa）	179	抗拉强度（MPa）	1567
电导率（%IACS）	60.4	1%伸长时应力（MPa）	1302
伸长率（%）	2.0	伸长率（%）	5.1
加热后抗拉强度（230℃×1h）（MPa）	148.0	100d 扭转（次）	33
		1d 卷绕	未断裂
抗拉强度残留率（%）	91.6	镀锌层重量（g/m²）	247
自身卷绕试验	未断裂	4d 卷绕	无开裂和起皮
导线结构：耐热铝合金线 48×3.22mm 镀锌钢线 7×2.5mm			

表 3.5-29 导线主要特性试验结果

项 目	结 果	条 件
常温综合拉断力	109.5、109.8 和 109.6kN，平均 109.6kN	试样长 12m，环氧树脂端头，500kN 卧式拉力机
高温综合拉断力	150℃×3hr；109.5、108.9、109.3kN	加热区长 10m，热电偶测温，其他同上

续表

项　目	结　果		条　件
弹性模数及应力—应变曲线	最终弹性模数 66.4GPa		标距长 2m，测试精度应力为 ± 1%，应变为 ±0.01mm/2m，其他同上
振动疲劳性能	3.01×10^7、3.02×10^7、3.01×10^7 次振动后未见有任何开裂断股现象		振动角：25′～30′，张力 25%计算拉断力，试样塔距 56m
热膨胀性能	热膨胀系数： 1)室温～100℃ $\alpha=21.2\times10^{-6}℃^{-1}$ 2)100～160℃ $\alpha=21.1\times10^{-6}℃^{-1}$		加热区长 13.5m，张力 25.98kN(25% RTS)，测试有效长 3m
载流量	导体温度（℃）	载流量（A）	无风、无日照自然对流，试样张力 25.98（25% RTS），加热区长 13m，热电偶测温，环境温度 10.5～10.8℃
	45.4	560	
	61.0	660	
	83.1	800	
	104.4	940	
	126.1	1060	
	147.9	1160	
	157.7	1190	
	168.6	1238	
20℃时的直流电阻	理论值：R20 ≤ 0.075 14Ω/km 实测值：0.074 25Ω/km		试样长 12m，测试有效长 10m
蠕变性能	蠕变量：在 15%、25%和 35%RTS 张力下的蠕变方程可推算出 10 年(87 600h)后的蠕变量分别为 207、491 和 908mm/km		100kN 卧式拉力试验机，试样端间长 14m，试样标距长 5m，环氧树脂端头 试验温度：(20±1)℃ 张　力：15%（RTS）、25%(RTS)、35%(RTS) 试验时间：1000h

6.3.3　高强度耐热铝合金线的性能

根据三峡电网大跨越工程对高强度耐热铝合金大跨越导线的需要，要求直径 4.40mm 高强度耐热铝合金线的抗拉强度为 265MPa。上海电缆研究所与上海中天铝线有限公司合作，首先对上海中天铝线有限公司的生产设备进行了部分的调整和完善，在此基础上于 2005 年初成功试制出高强度耐热铝合金线。产品经材料及特种光电缆检验实验室检测，技术性能指标都达到了三峡工程的要求。三峡电网用铝—锆—铁—铜系热处理型高强度耐热铝合金线的主要性能如表 3.5-30 所示。

表 3.5-30　三峡电网用高强度耐热铝合金线的主要性能

线　种	直径（mm）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	电导率（%IACS）	抗拉强度残留率（%）
高强度耐热铝合金线	4.40	269	2.5	55.4	91.7

注　抗拉强度残留率指单线在 230℃下加热 1h，在常温下静置 24h 后的抗拉强度与常温下原始抗拉强度的比值。

6.3.4　特耐热铝合金线的性能

现以添加稀土元素钇和采用新的制造方法制造的一种特耐热铝合金线为例进行介绍。这种特耐热铝合金线制成架空导线与通常的同截面钢芯铝绞线相比，其容量约提高 2 倍，不仅适用于变电站内部的大电流母线，也适用于大容量架空导线。

(1) 特耐热铝合金线与高导电耐热铝合金线的典型性能比较（见表 3.5-31）。

表 3.5-31　两种耐热铝合金线的典型性能比较　　线径：4.5mm

特　性　值	特耐热铝合金线	高导电耐热铝合金线
电导率（%IACS）	58.4	60.5
抗拉强度（MPa）	174.4	175.4
伸长率（%）	2.8	2.7
弹性模数（MPa）	62 720	62 720
疲劳极限（MPa）	59.8	59.8
扭转次数（转）	42	42
电阻温度系数（$℃^{-1}$）	0.003 9	0.004 0
线膨胀系数（$℃^{-1}$）	23.1×10^{-6}	23.1×10^{-6}

(2) 短时加热与性能的变化。直径 4.5mm 特耐热铝合金线的软化特性如图 3.5-35 所示。之所以有较好软化特性，应得益于添加元素钇和新的制造工艺。

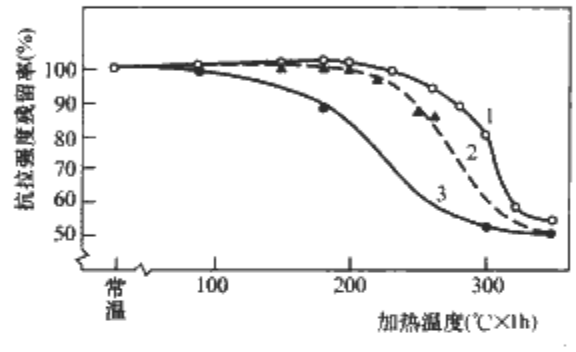


图 3.5-35　直径 4.5mm 特耐热铝合金线的软化特性
1—特耐热铝合金线；2—电导率（58%IACS）的普通耐热铝合金线；3—硬铝线

(3) 长时间加热与性能的变化。加热时间与抗拉强度残留率的关系，如图 3.5-36 所示，由此可推断出长时允许温度和短时允许温度。这种合金线的最高工作温度为 230℃。所谓长时允许温度指的是时间为 30 年，推定其那时的抗拉强度残留率仍在 90%以上，而短时允许温度指的是时间为 400h，推定其那时的抗拉强度残留率仍在 90%以上。由图 3.5-36（a）可以看出此种线的长时允许温度在 200℃以上，而短时允许温度为 230℃以上。这种合金线具有优良的耐热性，连续使用最高温为 200℃以上和短时使用最高温为

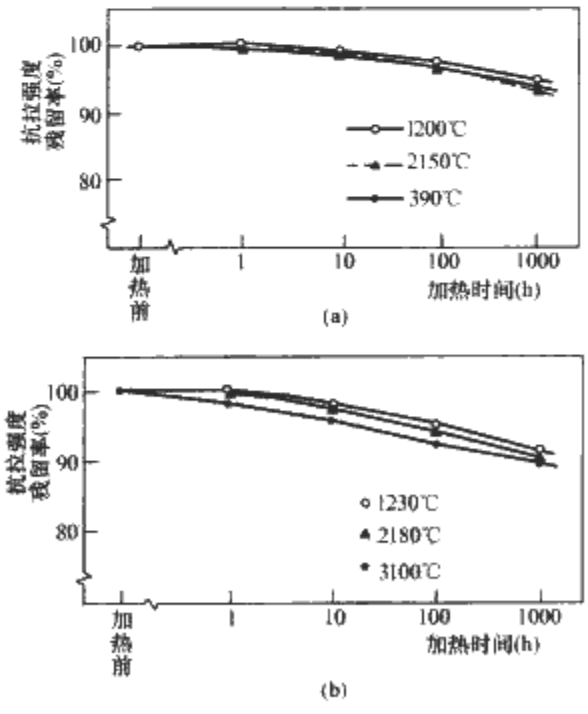


图 3.5-36　长时加热后的残留抗拉强度
(a) 长时允许温度的推断；(b) 短时允许温度的推断
1、2、3—代表说明，见图 3.5-35

230℃以上是十分有保证的。

（4）高温强度。由图 3.5-37 示出了在各温度下，保持 30min，所测得的试验结果。

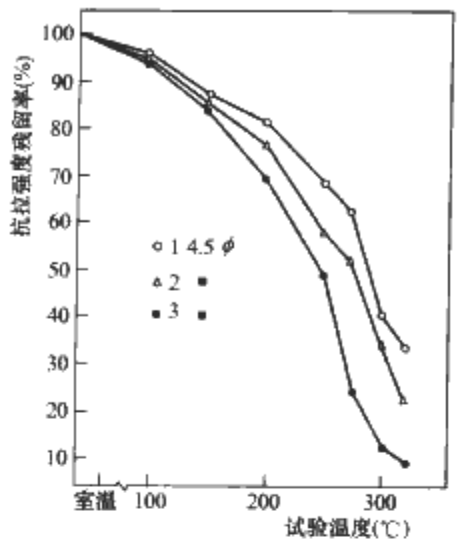


图 3.5-37 高温抗拉强度（保持 30min）

1、2、3—代表说明，见图 3.5-35

（5）蠕变特性。蠕变特性在线路设计上是重要的特性值之一，它是判别材料长期使用安全性的指标。图 3.5-38 示出了蠕变时间与蠕变伸长率的关系。由图可以看出，以连续允许温度 200℃设计，对此种合金线具有高的蠕变特性。

（6）振动疲劳性能。此种合金线的常温振动疲劳试验结果如图 3.5-39 所示。

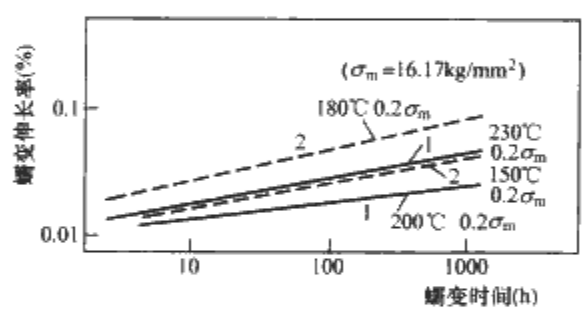


图 3.5-38 特耐热铝合金线的蠕变特性（线径 4.5mm）

1、2—代表说明，见图 3.5-35

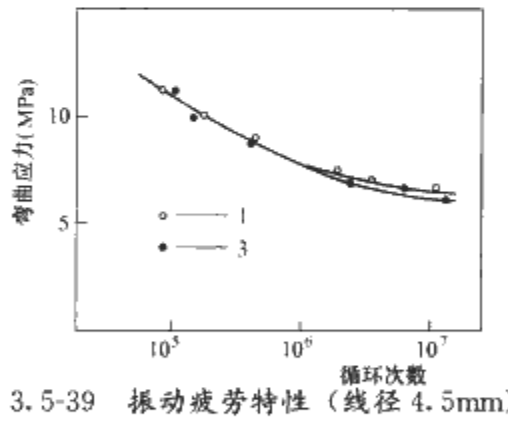


图 3.5-39 振动疲劳特性（线径 4.5mm）

1、3—代表说明，见图 3.5-35；使用中村式疲劳试验机

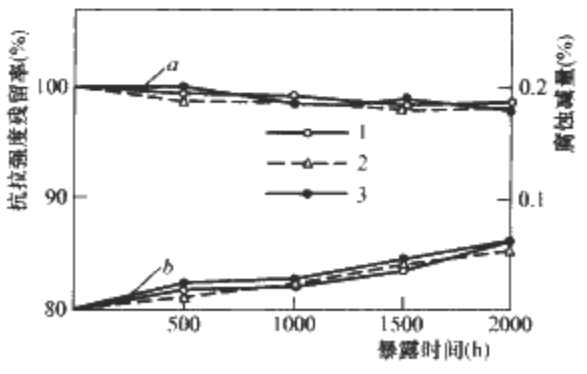


图 3.5-40 盐水喷雾试验结果

线径：3.2mm；1、2、3—代表说明，见图 3.5-35；

a—抗拉强度残留率；*b*—腐蚀减量

（7）耐蚀性能。以盐水喷雾试验代表海岸地带的试验结果如 3.5-40 所示。以亚硫酸气体暴露试验代表工业地带的试验结果如图 3.5-41 所示。

（8）导体规格与载流量。把此种合金线绞合成不同截面积的导线后，其载流量值如图 3.5-42 所示。

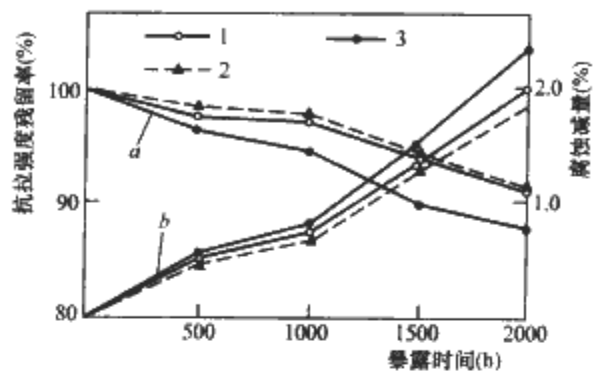


图 3.5-41 亚硫酸气体试验结果

线径：3.2mm；1、2、3—代表说明，见图 3.5-35；

a—抗拉强度残留率；*b*—腐蚀减量

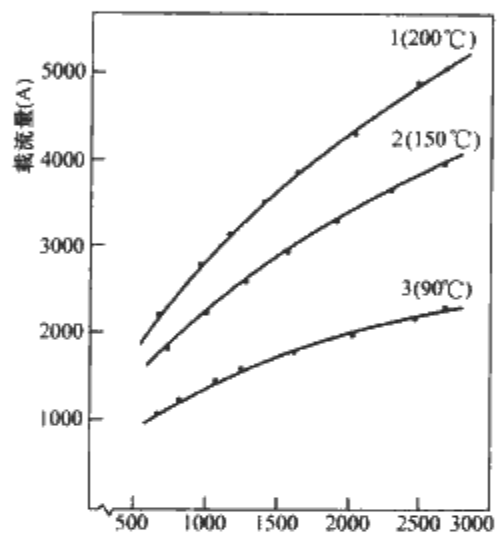


图 3.5-42 导体面积与载流量的关系

1、2、3—代表说明，见图 3.5-35

7 电缆屏蔽编织用铝合金线

目前，CATV 同轴电缆屏蔽编织用的铝合金线，主要有 Al-Mg 和 Al-Mg-Si 两个品种，前者的用量较大，我国自产自用加外销国外，2006 年年产量已达 3 万 t 左右，约为前十年的 10 倍。这种编织线一般都为细线，直径 0.25～0.12mm 之间，用于代替镀锡铜编织线。随着铜包铝线应用的扩大，除直径 0.41（0.40）mm 的铜包电工铝芯的铜包铝线（在市话电缆和数据电缆上用于代替铜线）外，亦制造铜包铝镁合金芯的铜包铝线（直径一般在 0.40mm 以下），用以代替铝镁合金编织线。在编织线上的代用有不同的观点，认为如用铜包铝镁合金线，同样存在铜铝接触的电化腐蚀问题，特别在湿热的地区使用，到底如何，目前还说不清，有待在实际使用中来考验。

7.1 铝镁合金线

铝镁合金线，在电缆编织屏蔽用铝合金圆线标准（JB/T 8998—1999）中的型号为 LHP2 型。

7.1.1 铝镁合金的成分

国内外普遍应用的牌号为 5154 和 5154A，相当于我国的牌号为 LF3。它们的化学成分如表 3.5-32 所示。

表 3.5-32　　5154、5154A 和 LF3 的化学成分　　%

牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	其他		Mn+Cr	Al
											单个	合计		
5154	0.25	0.40	0.10	0.10	3.1～3.9	0.15～0.35	—	0.20	0.20	—	0.05	0.15	—	余量
5154A	0.50	0.50	0.10	0.1～0.5	3.1～3.9	0.25	—	0.20	0.20	—	0.05	0.15	0.10～0.50	余量
5154B	0.35	0.45	0.05	0.15～0.45	3.2～3.8	0.10	0.01	0.15	0.15		0.05	0.15	—	余量
LF3	0.50～0.80	0.50	0.10	0.30～0.60	3.2～3.8	—	—	0.20	—	—	—	—	—	余量

5154 合金含镁量为 3.1%～3.9%，还含少量锰、铬等。在实际生产中往往成分变化较大，如加铬达 2%左右，由此成本上升，但拉出的线可获得较好的光泽。5154 合金属中等强度的防锈铝合金，热处理不能获得强化效果。作编织线用的铝镁合金线一般以软线交货，属中强度（220MPa）铝镁合金编织线。该种合金的特点是耐蚀性能、焊接性能和冷加工性能良好。它的制线方法有三种，即热轧（连铸连轧法）制杆—冷拉线、热挤制杆—冷拉线和水平液体引杆—冷拉线。

7.1.2　铝镁合金的组织

根据 Al—Mg 二元相图(图 3.5-43)，共晶温度下镁在铝中最大的溶解度为 17.4%，可是在连铸条件下到底为多少，尚不清楚，但在半连续铸造的快速冷却条件下，溶解度仅为 3%～6%，因此当合金中镁含量超过这一值时，合金组织中将出现 α(Al)+Mg_5Al_8 共晶体。

微量添加元素 Mn、Cr、Ti 和 Be 以及杂质元素 Fe 和 Si 在 Al—Mg 系中除形成少量 Mg_2Si 和(FeMn)Al_6 相外，没有发现其他相。

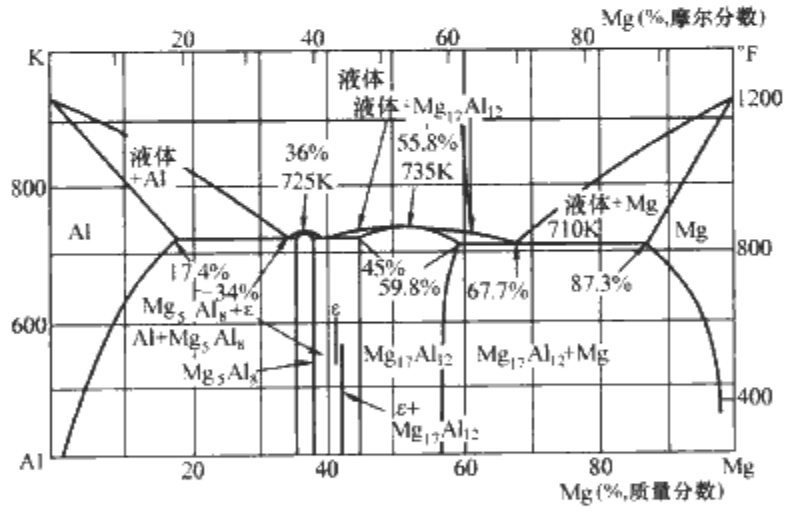


图 3.5-43　铝-镁二元相图

7.1.3　添加元素的作用和杂质元素的影响

铝—镁系的主要元素为镁和锰，而最常用的少量添加元素有钛、锆、铬、硅和硼。

镁——具有提高抗拉强度，特别是提高屈伏极限的作用。当镁由 1%增加到 6%时，强度增加最明显。含镁量在 4.5%以内，任意加热此种合金仍有保持其高的耐腐性能。

锰和铬——锰和铬的作用相似，具有提高基体材料和焊接部位的抗拉强度，也有提高抗应力腐蚀的作用。

钛和锆——具有细化铸造组织，在材料结晶时抗热裂纹的能力。

硼——具有改善在熔炼、铸造、焊接、轧制、锻压和挤压加热过程中的氧化问题。

杂质元素铁和硅对铝—镁系合金性能的影响为：

硅——含硅 0.2%～2%，能使力学性能，特别是伸长率下降。

铁——使力学性能下降，耐蚀性能变坏，特别当锰存在时。

随着硅、铁的增加，在轧制时硅对塑性的不利影响比铁大；但硅能改善 5154 合金的焊接性能，故必要时可在合金中加入 0.5～0.8 的硅。

7.1.4　提高铝—镁合金强度的方法

提高冷加工变形度是方法之一，当冷加工量很高时，耐蚀性有所下降，但仍保持在较高的水平下；提高含锰量（0.8%～1.1%）是方法之二，加锰可引起热挤压效应（提高热挤压材料的强度，因为这种合金无热处理强化效果）；在热轧材料中，当锰增加时，仅能使晶粒拉长的程度增加，但看不到有晶粒细化的现象。据研究表明，当存在拉长的晶粒组织时，再结晶现象实际上消失了，而保持着变形组织。

7.1.5　铝—镁合金的耐腐蚀性能

这种合金的耐蚀性能主要取决于合金中所含的镁量和固溶体的分解程度及其分解特点。当铝—镁系合金中沿晶界析出的 β（Mg_2Al_3）相呈链状连续时，合金就会出现晶间腐蚀和腐蚀破裂的敏感性。5154 合金是两相合金，因为 β 相沿晶间呈不连续的析出，所以具有高的耐蚀性能。

7.1.6　5154 合金的工艺参数

熔炼温度：700～750℃。

铸造温度：710～720℃。

退火温度：345℃，不需要保温。

热加工温度：260～510℃。

7.1.7　5154 合金线的制造

目前，我国 5154 合金的制杆方法有两种。一种为液体水平引杆（一般直径 7.5mm），捆重约 30kg，现在国内用得最多。此法一次投资少，产品成本低，但它的质量水平较低，此种制杆方法已相当陈旧，在导体用铝和铝合金杆的生产中早已淘汰，被连铸连轧法所取代；另一种为连铸连轧制杆（一般直径 9.5mm），捆重约 2t 左右，其优缺点与前者相反，且产量较大。制造工艺流程如图 3.5-44 所示。拉线、退火及它们的设备与铝和其他铝合金线相似。只因屏蔽编织用线的直径多数很细，可达 0.12mm，容易拉丝断线，所以特别在细拉阶段更应注意：拉线配模与设备的匹配、润滑剂及其控温和循环过滤、退火温度和时间的选择，其中成品退火选用连续管式可监控退火炉可以显著提高铝镁合金线拉断力和伸长率的稳定性及均匀性、拉线模的选材及模子的工作角，在大拉机上可选用硬质合金模，中、小拉线机上都采用聚晶钻石模，在拉制细线时用天然钻石模更好，以保证线材的表面质量，建议的模子工作角如表 3.5-33 所示。

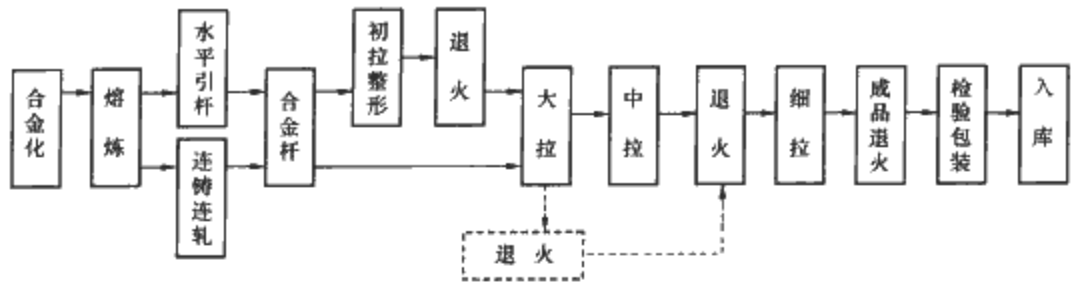


图 3.5-44 铝—镁合金线制造工艺流程

表 3.5-33 拉线直径与模子工作角

拉线直径 (mm)	角度 (2α) (°)	拉线直径 (mm)	角度 (2α) (°)
0.12～0.60	12～14	2.51～3.70	18～20
0.61～1.50	14～16	3.71～5.00	21～23
1.51～2.50	16～17	≥5.00	24～26

目前，直径 0.12mm 的铝镁合金线（软线），其拉断力和伸长率分别可达 5.41N 和 12%的水平，已达到国外同类产品的先进水平，因此，产品已远销东南亚诸国。

7.2 铝镁硅合金线

铝镁硅合金线在电缆编织屏蔽用铝合金圆线标准（JB/T 8998—1999）中的型号为 LHP1 型。

编织屏蔽用铝镁硅合金线的成分、制杆方法同本章（5.3）高强度铝合金线。但用于架空导线的铝镁硅合金线，其直径一般在 1.7mm 以上，而用于编织屏蔽的铝镁硅合金线，其直径比较细，一般在 0.2～0.12mm，强度又比较高，属高强度（300MPa）铝镁硅合金编织线。

自铝合金杆开始，拉制铝镁硅合金线和铝镁合金线的方法，拉线设备、润滑、模具等都基本上是一样的，但工艺方法是不同的。这是因为铝镁合金是一种通过热处理不能获得强化效果的合金，而铝镁硅合金具有良好的热处理强化效果。因此，在拉制铝镁硅合金细线时，如果采用拉线—退火—拉线—成品线退火的方法就不能达到标准的要求，必须将固溶处、淬火、冷加工率（总加工率和每道次加工率）和人工时效处理，在工艺过程中匹配好，以获得最终的性能要求，并能在合适的拉线速度（特别在拉细线时）下顺利拉线。

7.3 电缆编织屏蔽用铝合金圆线标准(JB/T 8998—1999)

电缆编织屏蔽用铝合金圆线有两个型号，即：

LHP1 型（铝镁硅合金线）—第一种性能电缆编织屏蔽用铝合金圆线；

LHP2 型（铝镁合金线）—第二种性能电缆编织屏蔽用铝合金圆线。

而性能代号为：

1—抗拉强度 300MPa，伸长率 3%和电阻率 0.032 84 Ω·mm²/m（相当电导率 52.5%IACS），属高强度型。

2—抗拉强度 220MPa，伸长率 6%和电阻率 0.053 88 Ω·mm²/m（相当电导率 32.0%IACS），属中强度型。

两种型号的线，其标称直径、线径公差如表 3.5-34 和表 3.5-35 所示。铝合金圆线的拉断力、伸长率和电阻率（电导率%IACS）应符合表 3.5-36 规定。为了计算起见，LHP1 和 LHP2 型铝合金线可采用如表 3.5-37 所示的数值。

表 3.5-34 标称直径

型号	标称直径
LHP1	0.12、0.15、0.18、0.20
LHP2	

表 3.5-35 线径公差 mm

标称直径 (d)	公差
$0.10 \leqslant d \leqslant 0.16$	±0.004
$0.16 < d \leqslant 0.22$	±0.005

表 3.5-36 拉断力、伸长率和电阻率（电导率%IACS）

型号	标称直径 (mm)	拉断力 (N)	伸长率 (%)	20℃时的最大电阻率 (Ω·mm²/m)（%IACS）
LHP1	0.12	≥3.39	≥3.0	0.032 84 (52.5%IACS)
	0.15	≥5.30		
	0.18	≥7.63		
	0.20	≥9.42		
LHP2	0.12	≥2.49	≥6.0	0.053 88 (32.0%IACS)
	0.15	≥3.89		
	0.18	≥5.60		
	0.20	≥6.91		

表 3.5-37 密度和电阻温度系数

型号	密度 (kg/dm³)	电阻温度系数 (1/℃)
LHP1	2.703	0.003 6
LHP2	2.66	0.002 0

8 耐蚀铝合金线

为了改善采用导线涂防腐油所带来的成本增加和防腐质量上的不足，所以开发了耐蚀铝合金，以提高导体金属材料本身的耐蚀能力。据研究表明，铝的耐蚀性不一定取决于铝中的杂质的多少，杂质多的不一定耐蚀性就差，而要根据杂质的种类而定，如高强度铝镁硅合金（Aldrey）的耐蚀性，是由于合金中的镁（形成 Mg_2Si）对铝起了阳极作用；再如电工用铝中杂质铁对耐蚀性的不良影响，为了抑制铁的作用，添加既不降低铝的导电性，又有比铁或铁与铝形成的金属间化合物（主要是 Al_3Fe）电极电位低的金属，例如铍，形成合金能提高耐蚀性。日本藤仓公司曾研制的耐蚀铝合金，其抗拉强度最低值为 158.5～184.8MPa，伸长率大于 1.4%～2.0%，电导率大于 61%IACS，振动疲劳和蠕变特性与硬铝线一样，耐蚀性能如图 3.5-45～图 3.5-47 和表 3.5-38 所示。

山东大学对输电线路用耐蚀铝合金导线进行了研究，初步分析与研究了它的机理，并制成线材进行了导电性和耐蚀性能的比较，结果表明该技术对提高铝合金导线的耐蚀性

能，同时保持良好的导电性能是有效的。

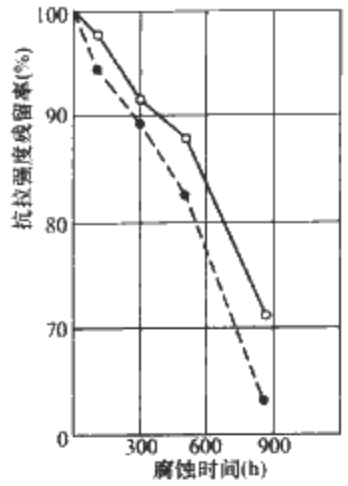


图 3.5-45　SO_2 气体腐蚀试验

—○—耐蚀铝合金线（直径 0.5mm）

----●---- 硬铝线（直径 0.5mm）

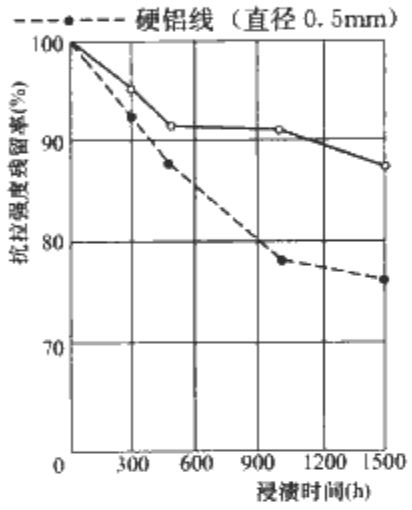


图 3.5-46　人工海水浸渍试验

—▫—耐蚀铝合金线（直径 0.5mm）

----●---- 硬铝线（直径 0.5mm）

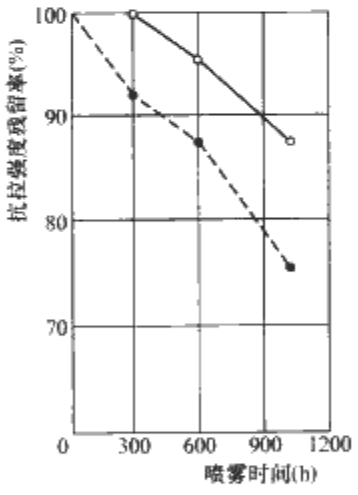


图 3.5-47　盐水喷雾试验

—△—耐蚀铝合金线（直径 0.5mm）

----●---- 硬铝线（直径 0.5mm）

铝或铝合金导线经长期使用后在大气环境下不可避免地会产生腐蚀现象，主要以“晶间腐蚀”为特征，腐蚀后的导线其电导率受到影响，在维持原线路电负载的条件下，不仅增加了线损，同时运行时温度一般会不同程度地提高，温度的提高则又使腐蚀速度加快，从而形成恶性循环。目前，耐蚀类铝合金导线存在一个共同的缺点，就是随着耐蚀性能的提高，电导率下降。因此研究确保导线的导电率≥61%IACS 的前提下，并使之具有优良的抗大气腐蚀性能。该研究的思路是在电工级铝锭中，继续添加富铈稀土进行处理，使铝固溶体中硅含量继续减少，电导率进一步提高，然后再加入耐蚀元素，由于耐蚀元素的加入使电导率下降，由此在这一对矛盾中找出既满足电导率≥61% IACS，又能使耐蚀性能提高的经济合理平衡点。在电工级铝锭中添加 0.12%～0.23%的铝基富铈稀土和 0.18%～0.27%的铝基铌＋MB_{11} 制成的耐蚀铝合金杆和线与电工铝杆和线进行比较试验，其结果如表 3.5-39、表 3.5-40 和表 3.5-41 所示。

在耐蚀铝合金线组成成分选择上，以添加富铈稀土为佳，而诸耐蚀元素中以添加铌＋MB_{11} 为宜，并以铝基中间合金形式加入，其中成分均匀混合程度对性能影响很大。上述耐蚀铝合金线在满足国家标准电导率要求的基础上，可使耐蚀性提高 30%以上。

表 3.5-38　氢气发生试验①（φ2.0mm）

腐蚀液		1/10NaOH	3%NH_4OH	0.1H_2O_2＋3%NaCl
测定时间		100min	3h	96h
线种	硬铝线	575	263	5.25
	耐蚀铝合金线	470	159	4.70

① 以 10cm 长试样浸渍于腐蚀液中，测定气体发生量，单位为 $cm^3/dm^2/h$。

表 3.5-39　耐蚀铝合金杆与电工级铝锭铝杆的导电性能与耐蚀性能比较

耐蚀铝合金杆		电工级铝锭铝杆	
φ9.51mm 五组试样平均值		φ9.51mm 五组试样平均值	
20℃电阻率（Ω·mm^2/m）	耐蚀性能盐雾失重率[g/(m^2·h)]	20℃电阻率（Ω·mm^2/m）	耐蚀性能盐雾失重率[g/(m^2·h)]
0.027 94（61.7%IACS）	0.187	0.027 98（61.6%IACS）	0.479
φ6.43mm 五组试样平均值		φ6.43mm 五组试样平均值	
20℃电阻率（Ω·mm^2/m）	耐蚀性能盐雾失重率(g/m^2·h)	20℃电阻率（Ω·mm^2/m）	耐蚀性能盐雾失重率(g/m^2·h)
0.028 17（61.2%IACS）	0.179	0.028 04（61.5%IACS）	0.481

盐水喷雾试验条件：NaCl；$CuCl_2$，50±5g/L；0.26±0.2g/L pH＝3.1～3.3，试验温度(50±1)℃，试验周期 96h

表 3.5-40　耐蚀铝合金线与电工级铝线的盐水喷雾加速腐蚀试验比较

试样编号		试样 直径(mm)	试样 长度(mm)	腐蚀失重率[g/(m^2·h)]	平均失重率[g/(m^2·h)]
耐蚀铝合金线	1	2.807	160.1	0.186	0.184
	2	2.806	160.4	0.179	
	3	2.801	160.7	0.183	
	4	2.803	160.9	0.190	
电工级铝线	1	2.804	160.7	0.476	0.488
	2	2.807	160.3	0.481	
	3	2.803	160.1	0.487	
	4	2.806	160.5	0.479	

盐水喷雾试验条件：同表 3.5-38

表 3.5-41 耐蚀铝合金线与电工级铝线的全浸腐蚀试验比较

试样编号		试样直径 (mm)	腐蚀失重率 [g/(m² · h)]	平均失重率 [g/(m² · h)]
耐蚀铝合金线	1	2.807	0.413	0.396
	2	2.801	0.390	
	3	2.803	0.385	
电工级铝线	1	2.807	0.551	0.561
	2	2.804	0.570	
	3	2.802	0.560	

全浸腐蚀试验条件：4.5%～5.5%NaCl 溶液，用乙酸调整至 pH=7.0，25℃恒温不搅拌

9 铝合金导线的应用

铝合金导线的主要应用如表 3.5-42 所示。在架空导线上应用，都以多根圆线或型线绞合成绞线的型式出现；在作电磁线应用时，除圆线外，有时还制成扁形线型式；在作编织屏蔽线应用时，都为直径 0.2～0.12mm 的细线。

表 3.5-42 铝合金导线的主要应用一览表

续表

铝合金线线种	主要应用举例
高强度铝合金线	架空导线、大跨越架空导线、高海拔重冰区用架空导线、光缆组合(复合)架空地线、电缆铠装线等
中强度铝合金线	架空导线、绝缘电线线芯等
耐热铝合金线	大容量架空导线、变电站内部用大电流母线、绝缘电线电缆线芯、大跨越架空导线等
绝缘电线电缆导电线芯、电磁线及细线用铝合金线	绝缘电线电缆线芯、电磁线、半导体封装用键合线
编织屏蔽用铝合金线	电缆编织屏蔽用线、制成铜包铝合金线(直径 0.41mm 以下)用于编织屏蔽线等
耐蚀铝合金线	架空导线、需要耐腐蚀的导线等

9.1 高强度铝合金导线的应用

三峡工程龙泉至政平的±500kV 直流输电线路，在途经安徽省芜湖市东西梁山下游约 760m 处跨越长江，工程跨越档距 1910m，整个耐张段为 3050m。跨越方式为：耐张—直线—直线—耐张，跨越档距为：570m～1910m～507m。在此长江跨越工程上使用四分裂的特高强镀锌钢芯高强度铝合金绞线，型号为 4×AACSR/EST—450/200。该跨越工程由华东电力设计院设计，导线由上海电缆研究所和浙江富春江集团杭州电缆厂合作试制。有关 AACSR/EST—450/200 绞线的性能、高强度铝合金线的性能和镀锌钢线的性能分别如表 3.5-43～表 3.5-45 所示。

表 3.5-43 ±500kV 线路用 AACSR/EST—450/200 钢芯铝合金绞线的性能

项目		设计		工程实际要求	实测值
型号		AACSR/EST—450/200		AACSR/EST—450/200	AACSR/EST—450/200
结构与直径 (根/mm)	铝合金	42/3.70		42/3.70±1%	42/3.702
	钢	19/3.70		19/3.70±0.06	19/3.67
计算截面积 (mm^2)	铝合金	451.59		451.59	452.08
	钢	204.29		204.29	200.99
	总	655.88		655.88±2%	653.07
铝钢比		2.2		2.2	2.26
外径(mm)		33.3		33.3±1%	33.40
计算重量(kg/km)		2966(涂油)		2966(涂油) 2865(未涂油)	2916(未涂油)
计算拉断力(kN)		456.89		≥456.89	502.3
拉力重量比(km)		15.7		15.7	17.6
弹性模量①(MPa)		97 050		97 050±3000	96 120
20℃直流电阻①(Ω/km)		0.072 6		≤0.072 6	0.071 4
线膨胀系数①($1\times10^{-6}℃^{-1}$)		16.2		16.2	17.9
振动疲劳		振动角：30′；振动频率：(40±10)Hz 导线张力：25%RTS(即 42.65kN) 有效长度≥40m(实际 56m)；振动次数：3×10^7 次			3 根试样，导线不断股
10 年蠕变量①(mm/km)		导线张力：25%RTS 时			449
载流量②(A)	Ⅰ 20～70℃，90℃	环境条件	Ⅰ(国内常用)	Ⅱ(IEC61597—95)	946；1145
	Ⅰ 40～70℃，90℃	风速	0.5m/s	1.0m/s	636；926
		日照强度	1000W/m²	900W/m²	
		导体表面吸收系数	0.9	0.5	
	Ⅱ 20～70℃，90℃	导体辐射系数 L	0.9	0.6	
	Ⅱ 40～70℃，90℃	环境温度	20；40℃	20；40℃	1154；1357
		导体工作温度	70；90℃	70；90℃	857；1122

① 工程实际需要的实测参考值。

② 工程实际需要的实测参考值，要求：环境温度 40℃，导体温度 90℃时的载流量≥864A。

表 3.5-44　AACSR/EST—450/200 用铝合金线的性能

项　目	设　计	工程实际要求	实 测 值
外径(mm)	3.70	3.70±1%d	3.702
截面积(mm^2)	10.75	10.75±0.21	10.76
单重(g/m)	29.06	29.06±0.56	29.09
抗拉强度(MPa)	295.0	≥295.0	302
拉断伸长率(标距 250mm)(%)	3.0	≥3.0	6.1
电阻率(20℃)($\Omega \cdot mm^2/m$)	0.032 226	一批平均值 ≤0.032 226 单根最大值 ≤0.032 530	一批平均值 0.031 623 单根最大值 0.032 500
卷绕①	1D 绕 8 圈，应不断裂	1D 绕 8 圈，应不断裂	通过

① 卷绕速度小于或等于 60r/min。

表 3.5-45　AACSR/EST-450/200 用镀锌钢线的性能

项　目	设　计	工程实际要求	实 测 值
外径(mm)	3.70	3.70±0.06	3.67
截面积(mm^2)	10.75	10.75±0.35	10.58
单重(g/m)	83.64	83.64±2.7	82.30
抗拉强度(MPa)	1770	≥1770	1944
1%伸长应力(MPa)	1550	≥1550	1622
伸长率(标距 250mm)(%)	2.5	≥2.5	5.5
扭转次数(100D)	10	≥10	25
卷绕(5D)	8 圈不断裂	8 圈不断裂	通过
镀锌重量(g/m^2)	260	260	350
镀锌层附着性(5D)	镀层不开裂或起皮	镀层不开裂或起皮	通过
镀层均匀性	用肉眼观察镀层应光洁、连续，不允许有影响使用的任何缺陷		光洁、无缺陷

9.2　中强度铝合金绞线标准

我国还没有开发中强度铝合金导线，现以日本三菱电线工业标准为例，介绍如表 3.5-46 所示。

表 3.5-46　　中强度铝合金绞线

标称截面积(mm^2)	股数/线径(mm)	拉断力，最小值(kN)	计算截面积(mm^2)	参　考			
				外径(mm)	重量(kg/km)	20℃电阻(Ω/km)	标准长度(m)
38	7/2.6	8.30	37.16	7.8	101.5	0.810	900
70	7/3.5	14.6	67.35	10.5	184.0	0.447	600
110	7/4.5	22.5	111.3	13.5	304.1	0.270	600
150	19/3.2	33.1	152.8	16.0	418.7	0.198	1500
200	19/3.7	44.3	204.3	18.5	559.8	0.148	1300
240	19/4.0	51.2	238.8	20.0	654.5	0.126	1300
300	37/3.2	64.5	297.6	22.4	820.1	0.102	1500
400	37/3.7	86.3	397.8	25.9	1097	0.076 4	1300
510	37/4.2	103.8	512.5	29.4	1413	0.059 3	1100
660	61/3.7	142.2	655.8	33.3	1812	0.046 5	1300
850	61/4.2	171.1	844.9	37.8	2334	0.036 1	1000

9.3　耐热铝合金导线的应用

在架空输电线路上，采用耐热铝合金导线，提高导线的运行温度是达到大容量输电的办法之一。使用高导电耐热铝合金线(AT—1 型)、高强度(实属中强度)耐热铝合金线(AT—2 型)、高耐热铝合金线(AT—3 型)和特耐热铝合金线(AT—4 型)与不同的加强材料相组合，可构成不同的大容量耐热铝合金组合导线(表 3.5-47)。

9.3.1　变电站内部用耐热铝合金大电流母线

变电站内部用耐热铝合金大电流母线，在我国已获广泛的应用。在 2005 年以前，用的是导电率为 58%IACS 的耐热铝合金线，此后随着耐热铝合金线的发展，已改用电导率为 60%IACS 的耐热铝合金线制造大电流母线。现以武汉电缆(集团)股份有限公司生产的热处理型，电导率为 60%IACS 的耐热铝合金大电流母线为例，介绍如表 3.5-48 所示。

表 3.5-47　　大容量耐热铝合金组合导线举例

耐热铝合金线型号	加强材料线种	大容量耐热铝合金组合导线名称
1. AT—1 2. AT—2 3. AT—3 4. AT—4	1. 热镀(纯)锌钢线 2. 热镀锌－5%铝—稀土镀层钢线(即 Galfan 合金镀层钢线) 3. 热镀 Galfan 合金高强度股钢线 4. 铝包股钢线 5. 碳纤维和聚合物加强线 6. 铝包钢线 7. 热镀铝钢线 8. Bezinal®镀锌钢线	1. 钢芯—不同型号—耐热铝合金绞线 2. 铝包钢芯—不同型号—耐热铝合金绞线 3. 间隙型钢芯—不同型号—耐热铝合金绞线 4. 铝包股钢芯—不同型号—耐热铝合金绞线 5. PS 型低弧垂—不同型号—耐热铝合金绞线① 6. 碳纤维和聚合物复合芯—不同型号—耐热铝合金绞线 7. 钢芯型线同心绞—不同型号—耐热铝合金绞线

① 间隙型钢芯耐热铝合金绞线和股钢芯耐热铝合金绞线均属低弧垂导线，PS 型低弧垂耐热铝合金绞线指的是有一定松弛的耐热铝合金线层，耐热铝合金线绞层的长度制作得长于钢芯，使耐热铝合金线层有一定的松弛。这种结构，张力由钢芯承受，减小了导线的弧垂。PS 导线的结构大致地等同于钢芯铝绞线的结构。

表 3.5-48　　耐热铝合金大电流母线

线的型号：		NRLH60GJ—1440/135
线的结构	耐热铝合金线(mm)	88 股/4.56 直径
	镀锌钢线(mm)	19 股/3.00 直径
	截面积(mm^2)	耐热铝合金 1437.15
		镀锌钢线 134.30
		合计：1571.4
	外　径(mm)	51.48
电　阻(Ω/km)		0.020 7
拉断力(N)		364 000
重　量(kg/km)		5083.0
计算值	弹性模数(GPa)	66.53
	线膨胀系数(1/℃)	20.19×10^{-6}
	载流量(A)	120℃，2614
		150℃，3132

9.3.2 殷钢耐热铝合金导线和间隙型耐热铝合金导线

为了提高线路的输电容量，有各种办法(见图 3.5-48)，其中采用耐热铝合金导线是方法之一。

耐热铝合金绞(导)线用的各种耐热铝合金线的代号和性能如表 3.5-49 所示。各种耐热合金线的退火性能如图 3.5-49 所示，并示出了加热温度与强度残留率的关系，而连续允许温度与电导率的关系如图 3.5-50 所示。

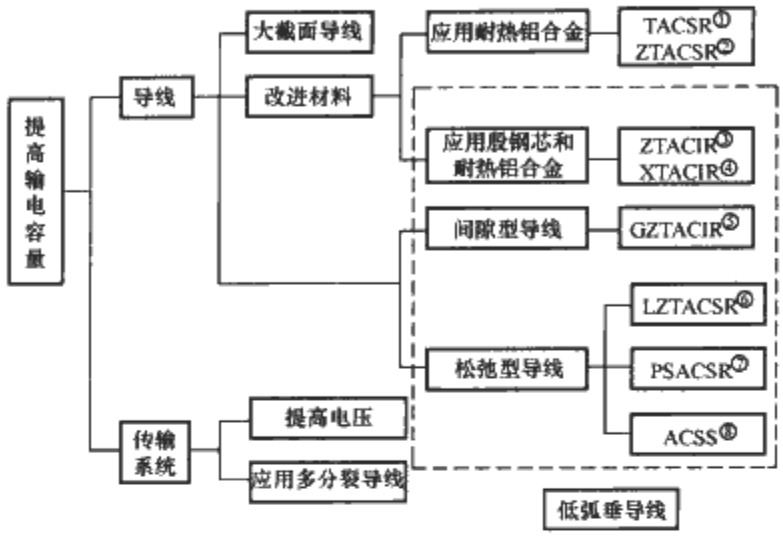


图 3.5-48 提高架空输电线路输送容量的方法

注：① 钢芯 AT—1 高导电耐热铝合金导线。② 钢芯 AT—3 高耐热铝合金导线。③ 殷钢芯 AT—3 高耐热铝合金导线。④ 殷钢芯 AT—4 特耐热铝合金导线。⑤ 间隙型殷钢芯 AT—3 高耐热铝合金导线。⑥ 松弛型钢芯 AT—3 高耐热铝合金导线。⑦ PS 型新型大容量低弧垂铝包钢芯耐热铝合金导线(将来 PS 导线作 GTACSR 和 XTACIR 的替代品，将计划用于现今的大容量输电线路)。⑧ 钢芯退火铝绞线。

表 3.5-49 各种耐热铝合金线的代号和性能

IEC 标准代号	日本及 ASTM 代号	美国和日本标准	抗拉强度(MPa)①	电导率(%IACS)	允许温度(℃)②	
					连续	短时(40h)
AT—1	TAL	JEC3406③	≥162	≥60	150	180
AT—3	ZTAL	JCS1045④	≥162	≥60	210	240
AT—4	XTAL	JCS1404④	≥162	≥58	230	310(IEC)
						290(日本)
—	EC—AL	ASTMB230	≥162	≥61	90	120

注 TAL 为 Zr—Al 合金；ZTAL 和 XTAL 为 Super(超)Zr—Al 合金。
①直径 3.5mm 的数值。
②基于由于退火，降低 10%抗拉强度的温度极限。
③日本电工委员会标准。
④日本电线电缆制造厂协会标准。

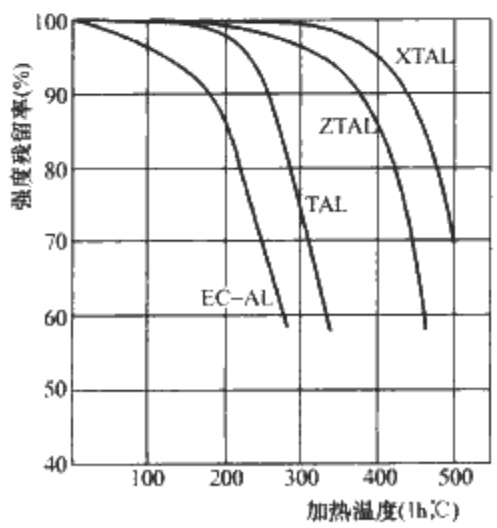


图 3.5-49 耐热铝合金的退火性能

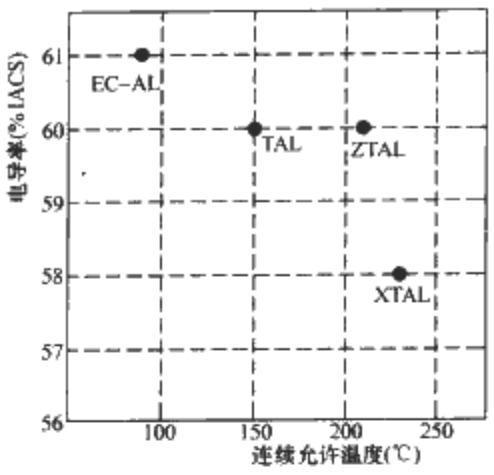


图 3.5-50 耐热铝合金的连续允许温度与电导率的关系

含镍(Ni-36%)的殷钢(InVar steel)，具有极小的热膨胀系数(见图 3.5-51)，它与耐热铝合金线绞合成的导线就有了低弧垂的特性。有关殷钢的热膨胀系数如图 3.5-52 所示。它的力学性能如表 3.5-50 所示。

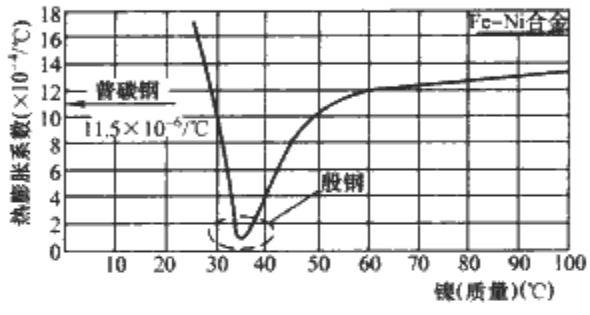


图 3.5-51 镍含量与热膨胀系数的关系

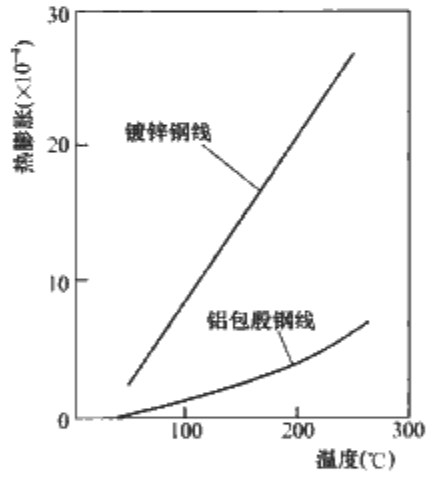


图 3.5-52 铝、普碳钢、铝包高强度殷钢和锌—5%铝—稀土合金镀层高强度钢线的热膨胀

铝线：$23\times10^{-6}℃^{-1}$。

普碳钢线：$11.5\times10^{-6}℃^{-1}$。

铝包高强度殷钢线：230℃以下，$3.7\times10^{-6}℃^{-1}$。

230℃以上，$10.8\times10^{-6}℃^{-1}$。

锌 5%铝稀土合金镀层的高强度殷钢线：

20～100℃，$<2.8\times10^{-6}℃^{-1}$。

100～240℃，$<3.6\times10^{-6}℃^{-1}$。

表 3.5-50 殷钢线的力学性能

殷 钢 线	抗拉强度(MPa)	弹性模数(GPa)
铝包高强度殷钢合金线	1080	152
锌 5%铝稀土合金镀层高强度殷钢合金线	1100	155

钢芯加强的耐热铝合金组合导线通常由表 3.5-51 所示的材料进行组合。此种组合导线的标称截面与载流量的关系如图 3.5-53 所示。

表 3.5-51　用钢芯加强的耐热铝合金组合导线的组合材料

名称和代号		铝股线材料代号	钢　芯
钢芯 AT—1 高导电耐热铝合金导线(日本代号：TACSR)		AT—1 (日本代号 TAL)	镀锌钢线或铝包钢线
殷钢导线	钢芯 AT—3 高耐热铝合金导线(日本代号 ZTACIR)	AT—3 (日本代号 ZTAL)	镀锌 5%铝稀土合金的或铝包的高强度殷钢线
	钢芯 AT—4 特耐热铝合金导线(日本代号 XTACIR)	AT—4 (日本代号 XTAL)	
钢芯铝绞线(ACSR)		EC—AL	镀锌钢线或铝包钢线

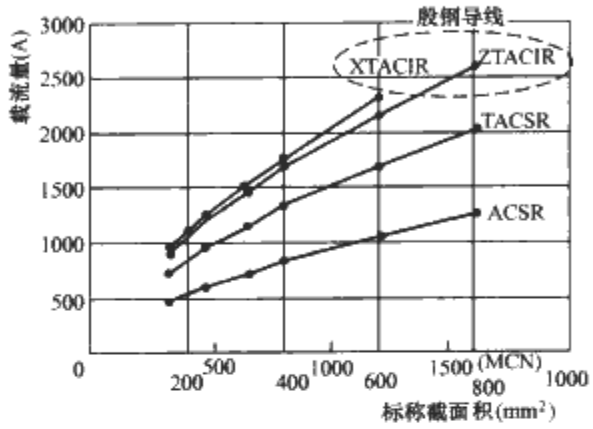


图 3.5-53　钢芯加强耐热铝合金组合导线标称截面与载流量的关系

随着架空输电线路送电容量的不断增加，耐热铝合金及其导线的耐热等级也随之增加，从而日本“J-Power systems corporation”公司(由原日本的住友电工和日立电线的合资公司)和瑞士“Sprint metal”公司先后开发了间隙型钢芯高导电耐铝合金导线(GTACSR)、间隙型钢芯高耐热铝合金导线(GZTACSR)、铝包殷钢芯高耐热铝合金导线(ZTACIR)和铝包殷钢芯特耐热铝合金导线(XTACIR)。

(1) 殷钢导线——铝包殷钢芯高耐热铝合金导线(ZTACIR)和铝包殷钢芯特耐热铝合金导线(XTACIR)。ZTACIR 和 XTACIR 均属低弧垂增容导线。由 ZTAL(AT—3)/XTAL(AT—4)耐热铝合金和铝包殷钢线或镀锌 5%铝稀土合金镀层的高强度殷钢线(抗拉强度 1100MPa，弹性模数 155 000MPa)组成的组合导线提供了优秀的弧垂特性和载流特性。由此，对现有的输电线路进行增容时将充分显示其优点，只需将现有的导线替换成同截面的 ZTACIR 或 XTACIR 导线即可达到 2 倍输送容量而不增加弧垂，无需调整或加强现有铁塔，安装与维护的操作与普通钢芯铝绞线相同，工期短。

1) ZTACIR 和 XTACIR 导线的结构。它们的结构如图 3.5-54 所示，右图采用梯形线结构的目的在于减小导线的外径；如果是等直径的话，可增加载流截面，从而增加载流量。

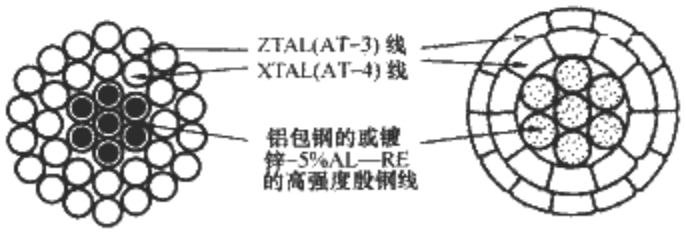


图 3.5-54　殷钢导线的结构

2) 殷钢导线的特性。ZTACIR 和 XTACIR 导线的载流量为同截面普通钢芯铝绞线(ACSR)的 2 倍(见图 3.5-55)。在高温条件下，保持着与 ACSR 几乎相同的弧垂，见图 3.5-56～图 3.5-58。

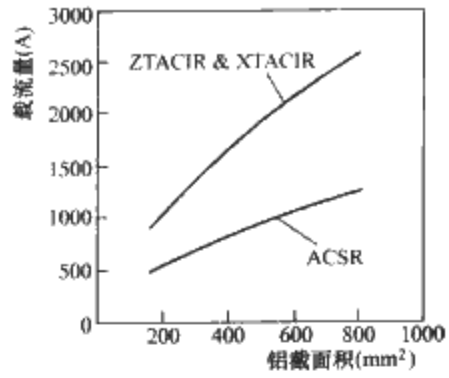


图 3.5-55　耐热铝合金线的截面与载流量的关系

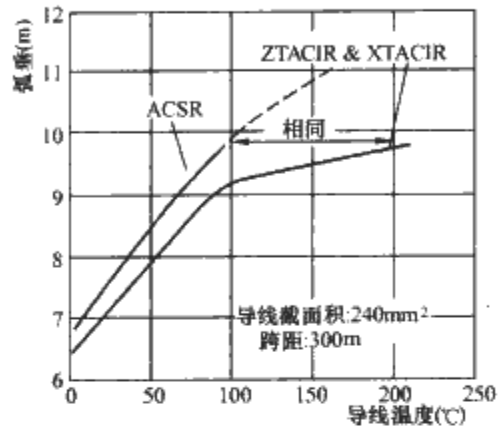


图 3.5-56　导线温度与弧垂的关系和钢芯铝绞线(ACSR)的比较

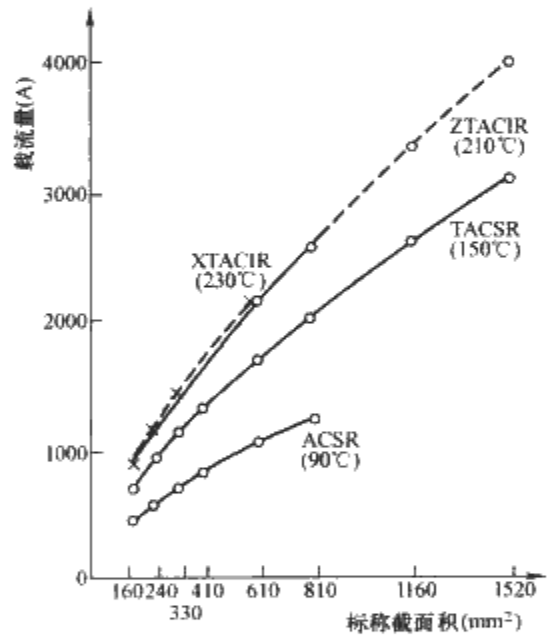


图 3.5-57　耐热铝合金导线的连续载流量与钢芯铝绞线(ACSR)的比较

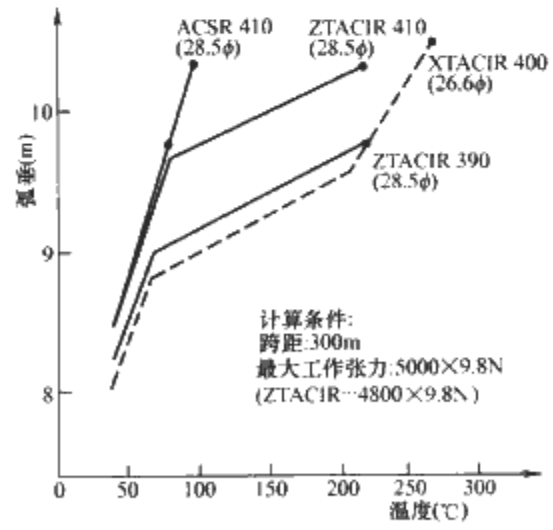


图 3.5-58　耐热铝合金导线弧垂与温度的关系和钢芯铝绞线(ACSR)的比较

3) 殷钢导线的附件。为了增加散热面积，以达到耐热导线的载流量，所以 ZTACIR 和 XTACIR 导线的耐张线夹

的尺寸要比普通钢芯铝绞线(ACSR)的大，而其他的附件则与 ACSR 导线相同。

4) 殷钢导线的安装与维护。ZTACIR 和 XTACIR 导线的安装与维护操作与 ACSR 导线完全相同。

5) ZTACIR 与 XTACIR 导线的设计。ZTACIR 与 XTACIR 导线可设计成与现有的 ACSR 具有相同的机械和电气性能，也可按实际需要进行设计，表 3.5-52 为 ZTACIR 和 XTACIR 导线的设计示例，可供选用参考。

表 3.5-52　　ZTACIR 和 XTACIR 导线设计示例

标称截面	截面积 (mm²)			绞合线股 (根×mm)		直径 (mm)		计算拉断力 (N)	电阻 (Ω/km)	导线重量 (kg/km)			弹性模数 (GPa)		线膨胀系数 ($1\times10^{-6}℃^{-1}$)		载流量 (A)
	铝	铝包殷钢	总计	铝	铝包殷钢	芯	总			铝	铝包殷钢	总计	铝包殷钢	导线	铝包殷钢	导线	
160	159.3	37.16	196.5	30/2.6	7/2.6	7.8	18.2	60 300	0.176	441.5	265.2	706.7	152	78.9	3.7	16.0	932
240	241.3	56.29	297.6	30/3.2	7/3.2	9.6	22.4	89 900	0.116	668.9	401.7	1071	152	78.9	3.7	16.0	1233
330	326.8	52.84	379.6	26/4.0	7/3.1	9.3	25.3	98 200	0.087 1	905.4	377.0	1282	152	74.4	3.7	17.5	1519
410	413.4	67.35	480.8	26/4.5	7/3.5	10.5	28.5	124 600	0.068 7	1.145	480.6	1626	152	74.4	3.7	17.5	1746
610	612.4	79.38	691.8	54/3.8	7/3.8	11.4	34.2	166 500	0.046 8	1.698	566.4	2265	152	74.4	3.7	17.5	2206

(2) 间隙型耐热铝合金导线。由日本"J-Power systems corporation"开发的间隙型钢芯高导电耐热铝合金(AT—1)导线(GTACSR)和间隙型钢芯高耐热铝合金(AT-3)导线 [G(Z)TACSR]，它们的结构特征是在钢芯和耐热铝合金线绞层之间带有小的间隙。为此，这种间隙型结构在使用中提供了优良的弧垂特性和载流特性。因而，对现有架空线路进行增容时将充分显示其优点，只需简单地将现有的导线替换成上述的 G(Z)TACR 导线，即可增加 1.6～2 倍输送容量而不增加弧垂。

1) 间隙型导线的结构。它们的结构如图 3.5-59 所示。耐热铝合金线的内绞层采用梯形股线以保持钢芯和耐热铝合金内绞层之间的间隙。为了避免钢芯与耐热铝合金内绞层的摩擦，在间隙中填充耐热润滑(防腐)油，由此耐热铝合金绞层与钢芯是可独立移动的。

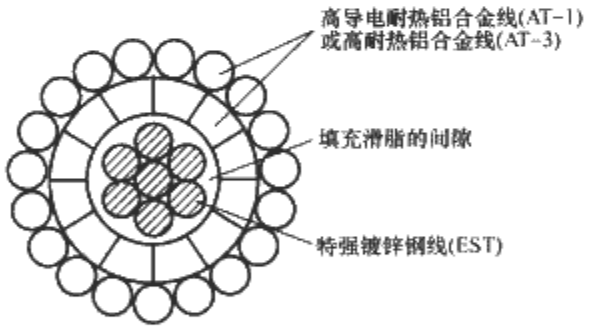


图 3.5-59　间隙型导线的结构

间隙型导线和自阻尼导线在结构的定义上目前正在新制订的 IEC 标准中进行协商，因为这两种导线在钢芯和内绞层之间，甚至在导电股线的绞层之间也可能存在间隙。

2) 间隙型导线的特性。GTACSR 和 G(Z)TACSR 导线与普通钢芯铝绞线(ACSR)相比其载流量分别为 ACSR 的 1.6 倍和 2.0 倍，见图 3.5-60。在相同档距下，如以普通钢芯铝绞线(ACSR)在 90℃时的弧垂为 100%，那么 GTACSR 导线在 150℃时为 96%，G(Z)TACSR 导线在 210℃时为 104%，见图 3.5-61。

3) 间隙型导线的附件。G(Z)TACSR 导线的耐张线夹的尺寸比普通钢芯铝绞线(ACSR)的稍大，以承载较大的电流，其他附件与 ACSR 导线的相同。

4) 间隙型导线的安装。G(Z)TACSR 的安装方法基本与 ACSR 相同，但要用一种特殊的架线方法，使在弧垂增加时，所有的拉力都落在钢芯上，故需要有经验丰富的技术人员指导安装。

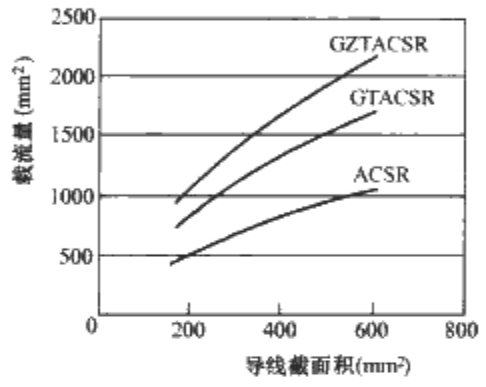


图 3.5-60　导线截面积与载流量的关系

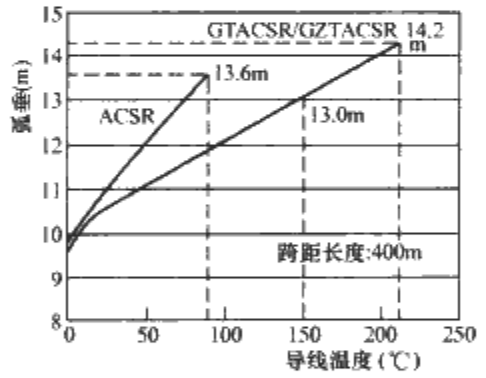


图 3.5-61　导线温度与弧垂的关系

5) 间隙型导线的设计。G(Z)TACSR 导线可设计成与现有的 ACSR 导线具有相同的机械性能，也可按实际需要进行设计，表 3.5-53 为设计示例，可供选用参考。

9.3.3　PS 型大容量低弧垂导线(PSACSR)

由日本 Chuhu 电力公司开发的 PSACSR 导线(预拉伸钢芯型导线，Pre-stretched Core type Conductor)，它没有改变普通钢芯铝绞线(ACSR)的结构，将耐热铝合金股线的绞层做得比钢芯更长，以提供一定的松(弛)度。采用这种结构，张力由钢芯独自承受。为增加容量在导电股线中采用了耐热铝合金线。因此，在导线的弧垂等于同规格 ACSR 导线的弧重时，PS 型导线的载流量可比 ACSR 导线增加 1.6 倍。PS 型导线不采用特殊的钢芯和 ACSR 导线一样。PS 型导线不像殷钢导线那样成本高，也不像间隙型导线那样安装时需要专门的拉伸作业。PS 型导线与 ACSR、GTACSR(间隙型钢芯高导电耐热铝合金)导线和 XTACIR(铝包殷钢芯特耐热铝合金)导线的结构和特性比较，见表 3.5-54。

表 3.5-53　　间隙型导线设计示例

导线截面积(mm²)		185	240	265	310	370
导线代号		Lynx	Hawk	Hen	Goose	Redwing
绞合(股数/直径)(1/m)	(Z)TAL	14/TZ①(3.23) 10/TZ(2.98)	15/TZ(3.46) 10/TZ(3.69)	19/3.1 10/TZ(3.94)	16/3.9 10/TZ(3.94)	17/4.15 12/TZ(3.83)
	Est	7/2.0	7/2.4	7/2.8	7/2.8	7/3.8
计算拉断力(kN)		62.4	86.8	107.5	113.8	179.5
直径(mm)	GTACSR/GZTACSR	17.8	20.6	22.6	24.4	27.3
	钢芯	6.0	7.2	8.4	8.4	11.4
截面积(mm²)	铝	184.5	247.9	265.3	313.1	368.2
	钢芯	21.99	31.67	43.11	43.11	79.38
	总计	206.5	279.6	308.4	356.2	447.6
重量(kg/km)	铝	700.3	955.9	1098	1227	1666
20℃下直流电阻(Ω/km)		0.160	0.119	0.111	0.094.1	0.079.8
载流量②(A)	GTACSR(150℃)	713	863	919	1021	1147
	GZTACSR(210℃)	871	1058	1128	1255	1414
弹性模数(GPa)	GTACSR/GZTACSR	77.1	78.1	81.9	79.2	87.4
	钢芯	205.9	205.9	205.9	205.9	205.9
线膨胀系数($1\times10^{-6}℃^{-1}$)	GTACSR	19.7	19.6	19.0	19.4	18.2
	钢芯	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
导线截面积(mm²)		410	413	520	620	
导线代号		Condor	Drake			
绞合(股数/直径)(1/mm)	(Z)TAL	15/4.6 10/TZ(4.55)	16/4.4 10/TZ(4.65)	18/TZ(4.01) 14/TZ(3.96) 10/TZ(3.88)	16/TZ(4.80) 12/TZ(4.75) 12/TZ(3.47)	
	Est	7/3.0	7/3.2	7/3.0	7/3.2	
计算拉断力(kN)		138.1	149.2	152.9	178.3	
直径(mm)	GTACSR/GZTACSR	27.6	27.8	29.0	31.5	
	钢芯	9.0	9.6	9.0	9.6	
截面积(mm²)	铝	411.9	413.2	518.0	615.7	
	钢芯	49.48	56.29	49.48	56.29	
	总计	461.4	469.5	567.5	672.0	
重量(kg/km)	铝	1557	1616	1856	2179	
20℃下直流电阻(Ω/km)		0.071.4	0.071.4	0.057.0	0.047.8	
载流量②(A)	GTACSR(150℃)	1257	1219	1356	1516	
	GZTACSR(210℃)	1500	1503	1667	1866	
弹性模数(GPa)	GTACSR/GZTACSR	77.3	79.1	74.4	73.5	
	钢芯	205.9	205.9	205.9	205.9	
线膨胀系数($1\times10^{-6}℃^{-1}$)	GTACSR	19.7	19.4	20.2	20.3	
	钢芯	11.5	11.5	11.5	11.5	

注　(Z)TAL：高耐热铝合金(AT—3)，EST：特强钢线。

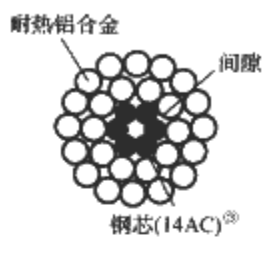
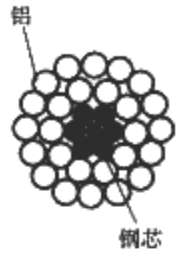
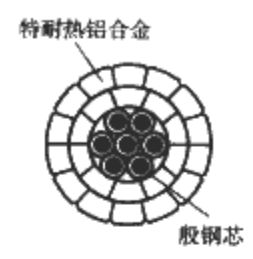
GZTACSR：间隙型高耐热铝合金导线。

GTACSR：间隙型高导电耐热铝合金导线。

① TZ 为梯形线。

② 环境温度：40℃，风速 0.5m/sec，风向 45°，太阳辐射 0.1W/cm²，导线表面吸热率和发射率。

表 3.5-54 PS 型、GTACSR 和 XTACIR 导线结构及特性比较(导线截面积：等同于 240mm²)

导线类型	PS 导线[预拉长芯型（新型大容量）]	钢芯铝绞线（ACSR）	普通低弧垂大容量导线	
			间隙型钢芯高导电耐热铝合金绞线（GTACSR）	铝包殷钢芯特耐热铝合金绞线（XTACIR）
结构				
外径(mm)	22.4	22.4	23.1	21.2
重量(kg/m)	1.073	1.110	1.187	1.184
弧垂①(m)	8.3	8.9	9.1	8.9
与 ACSR 相比，弧垂的差值(m)	−0.6	—	+0.2	0.0
电力传输容量②(MW)	121	77	124	155
与 ACSR 的传输容量之比	1.6	1.0	1.6	2.0

① 假定导线的最大工作张力为 35.5kN，塔与塔的跨距是 300m 时，导线的温度为下列温度时的弧垂，钢芯铝绞线：90℃，新型 PS 导线和间隙型导线：150℃，殷钢芯型导线：230℃。

② 假定传输电压为 77kV 时的计算值。

③ 14AC—最小铝层厚度为 14%铝包钢线标称半径的铝包钢线。

(1) PS 型导线的张力—伸长特性。PS 型导线的耐热铝合金绞层有一定的松弛度，当温度为常数时施加于导线上的架线张力，其载荷最初由钢芯独自承担。当载荷超过一定的水平时，其载荷由铝层和钢芯分担。所谓“载荷水平”也称“拐点载荷”，此时弧垂的减小较大。PS 型导线基本上是为现今的 ACSR 传输线路的大容量化而设计的，设定的拐点载荷为 25.5kN，以使其弧垂等于或低于 ACSR 导线的弧垂。240mm² PS 型导线在跨距 100m 条件下的张力—伸长特性如图 3.5-62 所示。由图可以看出，铝线层开始分担载荷的拐点载荷近似于 25.6kN，这和设计值一致。由图计算的弹性模数和最小铝层厚度为 14%铝包钢线标称半径的铝包钢线在载荷水平达 25.6kN 时的弹性模数一样。高于这 25.6kN 载荷水平时，所表示的是钢芯和铝层的总弹性模数。由这些结果，可以证实，载荷是按设计来分担的。

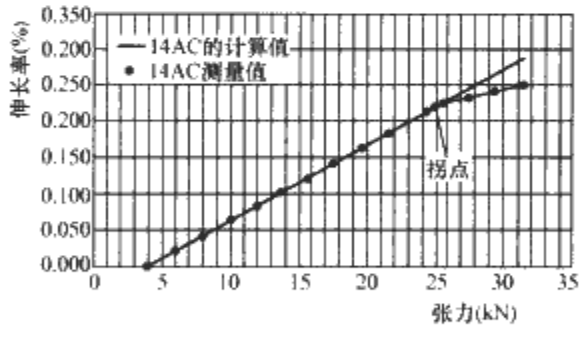


图 3.5-62 PS 型导线的张力—伸长率特性

注：14AC 是表示最小铝层厚度为 14%铝包钢线标称半径的铝包钢线。

(2) PS 型导线的热伸长性能。PS 型导线，在张力不变的情况下，温度由低变高，其载荷最初是由线层和钢芯分担。当温度超过一定的水平，载荷仅由钢芯承担。这个温度称为拐点温度，它随导线的安装状态而变。例如跨距为 500m，最大工作张力为 35.5kN 时，拐点温度为−34.2℃。将 PS 导线安装在跨距为 10m，20℃ 时所计算的张力为 17.4kN 的架线状态下，使导线的温度从−30℃变到 180℃（导线的最大工作温度），测量其热膨胀性能，见图 3.5-63。在图中所测的温度范围内，未见拐点出现。但线膨胀系数计算证明符合 12.0×10^{-6}/℃的钢芯(最小铝层厚度为 14%铝包钢线标称半径的铝包钢线)设计值。由此可以证实，就热膨胀性能而言，载荷的分配是按设计来进行的。

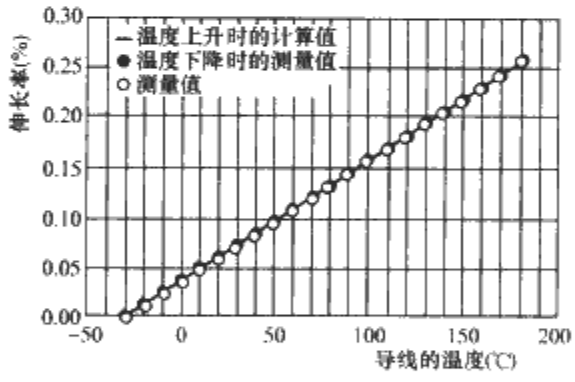


图 3.5-63 PS 型导线的热膨胀性能

(3) 弧垂性能。PS 型导线的弧垂特性如图 3.5-64 所示。在连续温度 150℃ 下，240mm² PS 导线的弧垂比 240mm² ACSR 导线(允许温度 90℃)的弧垂要小 0.7m。可见，采用 PS 型导线可减小导线弧垂。

(4) PS 型导线的振动疲劳特性。PS 型导线的张力总是由钢芯来承担，因此必须考察的是钢芯(最小铝层厚度为 14%铝包钢线标称半径的铝包钢线)铝包部分的振动疲劳特性，而不是绞在钢芯上的耐热铝合金线层的振动疲劳特性。据对以铝包钢线为(钢)芯的研究表明，其铝包部分，如在钢芯上施加张力负荷，则铝包部分会产生蠕变，结果导致应力松弛。例如当张力施加在钢芯上时，最初铝部分所分担的计算应力为 190MPa，但因铝部分所分担的应力很快被松弛，结果其初始的所分担的应力只有 40MPa，并在 2～3h 内，铝部分所分担的应力会因进一步松弛而下降到近 20MPa 不变的水平。因而对 PS 型导线的振动疲劳特性实测证明：当钢芯用于很高的张力条件下，铝包部分所分担的应力在短时间内就会降低到实际无意义的水平。如果采用所规定的应力

以固定的次数用反复应力振动，在钢芯的铝包部分不会产生裂缝。

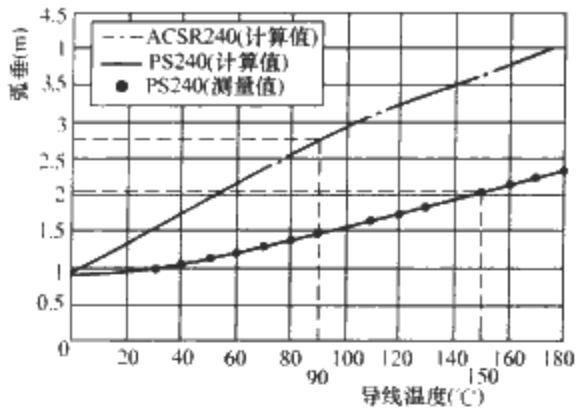


图 3.5-64　PS 型导线的弧垂特性

(5) PS 型导线的附件和安装。PS 型导线所用的附件与 ACSR 导线相同。因 PS 型导线采用了松铝层，故在架线操作时要关注铝层可能发生滑动。架线试验(见图 3.5-65 和表 3.5-55)表明：铝层和钢芯间没有产生滑动，从而证实，即使导线通过滑轮后其松弛效应也未消除。240mm² PS 型导线在表 3.5-55 所示条件下进行架线试验，测量了外径和节距。导线通过滑轮时，外径和节距均未发生变化。这表明该种导线在实际应用中不会有问题。

(6) PS 型导线在实际架空输电线路上的应用前景。日本在 77kV 的线路上，用标准的架线方法，已架设了 240mm² 的 PS 型导线，并已投入使用。因此 PS 型导线将作为普通的低弧垂大容量导线与 GTACSR 和 XTACIR 导线进行竞争，进一步用于现今的大容量架空输电线路。

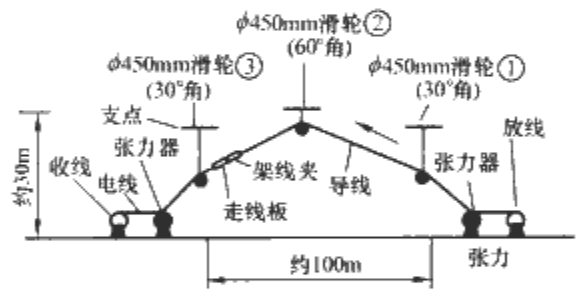


图 3.5-65　架线试验方法

表 3.5-55　　PS 型导线的架线试验条件

滑轮直径(mm)	φ300
水平角度(°)	30
走向角度(°)	60
架线张力	抗拉强度极限的 20%
通过次数	10

9.4　铝—镁—锌—稀土合金在贯通地线护套上的应用

贯通地线是用于铁路信号系统全线统一接地的电缆。以往使用铝包铜绞线的电缆结构，铅护套起着导电和耐土壤腐蚀的作用。但铅是有毒的金属，当电缆直埋使用时会对土壤和水造成污染；在挤压铅护套时，也会污染空气，影响操作人员的健康。天水铁路电缆工厂与中科院上海冶金所和上海金属腐蚀与防护中心共同合作开发了铝—镁—锌—稀土合金护套的贯通电缆。此种铝合金护套既有金属的导电性能，电缆在直接埋地使用时，不污染土壤，且电缆具有较好的耐腐蚀性能。表 3.5-56 示出了两种护套材料的抗拉强度和电阻率。带有铅护套和铝合金护套的贯通地线分别在上海地表土壤中和通用的管线钢土壤模拟介质 NS4 溶液中进行耐腐蚀对比试验，采用电化学线性极化方法测定两种试样的腐蚀速率，NS4 溶液的成分为：$(0.122KCl + 0.483NaHCO_3 + 0.181CaCl_2 \cdot 2H_2O + 0.131MgSO_4 \cdot 7H_2O)g/L$。试验结果如图 3.5-66、图 3.5-67 和表 3.5-57 所示。由此可以看出：铅和铝合金护套贯通地线的腐蚀速度基本相当，腐蚀率很小，铝合金护套贯通地线在土壤中长期使用能够达到与铅护套贯通地线同样的耐腐蚀效果。

贯通地线电缆的结构如图 3.5-68 所示。铝合金护套可用"康仿"连续挤压机进行包覆，但挤压机模具对进线绞合导体尺寸公差较高，模芯比绞合导体外径只大 0.4mm，因此，绞合导体在进入挤压机模具前先要经过一道定径模。电缆离开挤压机模口时，护套的温度较高，故要对电缆进行及时冷却，保报警线绝缘完好。

表 3.5-56　　护套材料性能比较

材　料	抗拉强度(MPa)	20℃电阻率(Ω·mm²/m)
铅	11～13	0.206 5
铝—镁—锌—稀土合金	147～176	0.028 0

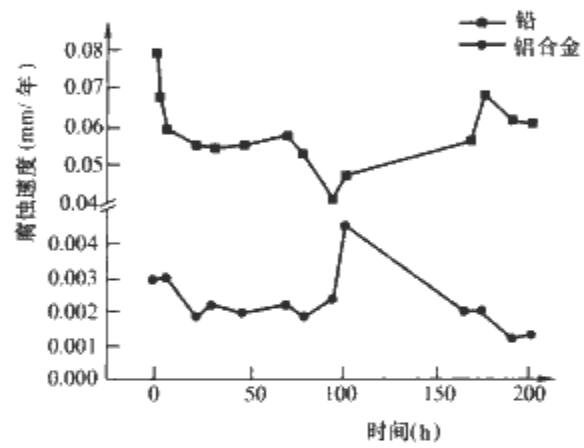


图 3.5-66　在土壤中腐蚀速度随时间的变化

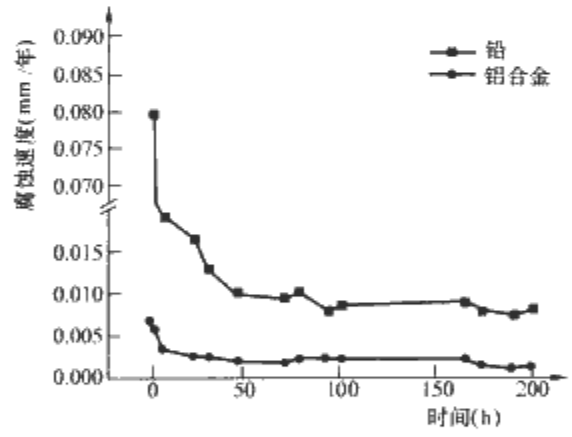


图 3.5-67　在 NS4 溶液中腐蚀速度随时间的变化

表 3.5-57　　护套材料腐蚀速度比较

腐蚀 / 材料	腐蚀速度(mm/年)	
	土壤中	NS4 溶液中
铅	5×10^{-2}	9×10^{-3}
铝—镁—锌—稀土合金	2×10^{-3}	3×10^{-3}

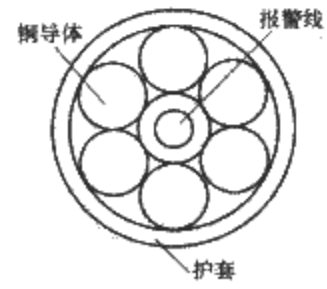


图 3.5-68　贯通地线电缆结构

第 6 章 双金属复合导体和镀层导体

双金属复合导体简称包复线，如铝包钢线、铜包钢线和铜包铝线等；镀层导体，简称镀层线，如镀铝钢线、镀铜钢线、镀铜铝线、镀锡铜线、镀银铜线、镀镍铜线、镀银镍铜线等，有时为了提高导线的表面性能，如抗高温氧化，改善焊接性能，也在包复线或镀层线上再镀锡或银或镍，如镀锡或镀银或镀镍铜包钢线（或镀铜钢线）。复合线和镀层线在性能、质量和成本上是有区别的，往往使用者在名称上容易混淆而影响使用效果，应提醒使用者注意恰当选用。包复线和镀层线的主要区别如表 3.6-1 所示。

表 3.6-1 包复线和镀层线的主要区别

序号	比较项目	包 复 线	镀 层 线
1	制造方法	包复金属与被包金属在外力作用下的复合	镀层金属籍电沉积或热浸镀在被镀金属的表面上
2	两种金属之间的结合状态	冶金结合，结合力强	电沉积或热浸镀结合，结合力相对弱
3	综合性能或表面特殊需要	综合性能及表面特殊需要	表面特殊需要，如耐高温氧化或焊接性能
4	表面层致密度、厚度和耐腐蚀性能	致密性好、无针孔，包复层较厚，且厚度易于调整，耐腐蚀性好	致密性相对差，对产品质量要求高的标准规定不允许超过 5 个孔隙（针孔），镀层较薄，耐蚀性相对较弱
5	导电性和节铜效果	在同样铜层厚度下，导电性能好；在同样导电性能下，铜层薄，可节约铜材	在同样铜层厚度下，导电性能稍差；在同样导电性能下，铜层厚，浪费铜材
6	生产对环保的影响	较好	有三废处理问题，特别是为了提高镀层的质量，采用氰化物镀铜时因环保问题而被禁止
7	生产成本	稍高	较低
8	选用	根据性能、质量的要求和价格合理选用	同左

1 双金属复合导体

1.1 铝包钢线

1.1.1 铝包钢线及其特点

铝包钢线是在一根圆钢丝外均匀、连续、紧密地包复着一层铝的双金属导线。铝的强度比较低，但比较轻，其密度约为铜的 1/3，铝的电导率比较高，仅次于银和铜，排行第 3，铝的耐腐蚀性能较好；钢的强度较高，但电导率和耐腐蚀性能较低，因此铝包钢线是铝、钢两者的强强结合和强、弱互补的产物，它具有下列特点：

（1）铝包钢线尺寸和性能可调范围比较大，产品尺寸从 ϕ1.2mm～ϕ10.0mm、强度范围从 50～1400MPa、铝层与线材截面积之比的可调范围可达 13%～85%，电导率的可调范围为 14%～55%IACS，图 3.6-1 示出了铝包钢线电导率与强度的可调范围。表 3.6-2 比较了在输电线路上使用的几种线材的性能。

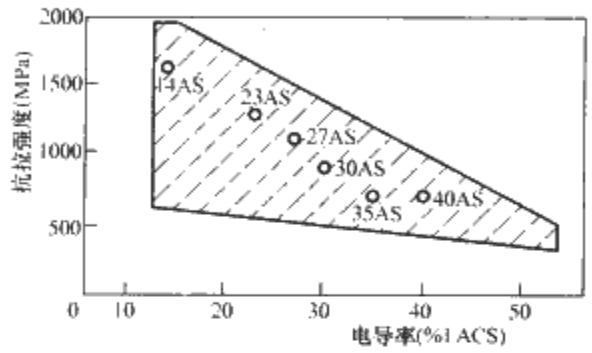


图 3.6-1 铝包钢线电导率与强度的可调范围

表 3.6-2 在输电线路上使用的几种线材的性能比较

项 目	铝线	高强度铝合金线	镀锌钢线	镀铝钢线	铝包钢线
耐腐蚀性能	好	较好	一般	较好	好
耐热性能	差	一般	好	好	好
抗拉强度（MPa）	160～200	295～300	1290～1764	1137～1274	680～1620
电导率（%IACS）	61.0	53.0	9.0	>9.0	14～40
密度（g/cm^3）	2.7	2.7	7.8	<7.8	4.64～7.14
抗蠕变性能	较低	一般	好	好	好
弧垂特性	较低	一般	好	好	好

（2）钢铝之间属冶金结合，所以结合强度好，有利于铝包钢线在强度上优势的发挥。

（3）与镀锌钢线相比具有较好的耐热性，因为铝的熔点比锌的高，至于钢的熔点就更高了。

（4）铝包钢线有好的耐腐蚀性能。如果铝包钢线与铝线或铝合金线绞合在一起，在架空输电线路上应用，不存在电化腐蚀的问题，但镀锌钢线就存在这个问题，由此最好使用防腐油隔离保护。

（5）导线的断面可以制成复杂的形状，例如，电气化铁路用的铝包钢接触线（电车线），它的形状呈“8”形，其制造的办法之一，就是利用“康仿”（Conform）连续挤压法一次挤制成形。

（6）铝包钢线有别于镀铝钢线，往往给选用者造成混淆。镀铝钢线和镀锌钢线一样，用热浸镀法制造，属加强材料，不是导体材料。镀铝钢线由于热浸镀的温度比镀锌钢线高，所以强度比镀锌钢线低，而且镀制工艺要求高，易于引起非连续的“针孔”缺陷，这样反而加速了腐蚀。20 世纪 60 年代以后，我国有关单位对镀铝钢线的研制进行了一点工作，但事实上没有实现工业化的生产，从而在我国未得到推广应用。此外，镀铝钢线在同时期受到了铝包钢线的强烈竞争，铝包钢线性能优势明显，展望未来镀铝钢线至少在输电线路上应用就不会有起色的了。

1.1.2 铝包钢线的制造

从历史发展看，研究、开发铝包钢线方法甚至多，如美

国“Copper-weld”公司的“粉末冶金法”，日本日立公司的“双铝带压接法”，中国上海电缆研究所和原湘潭电缆协作开发的“圆铝线一次成型压接法”，日本东北大学的“前张力挤压法（EFT—AS 法）”和苏联加里宁有色金属学院和莫斯科电缆厂协作的“真空挤压法和英国 Holton 和 BWE 公司的“摩擦挤压法”（Conform 挤压法）等，但真正实现过商品化大生产的仅为粉末冶金法、圆铝线一次成型压接法和摩擦挤压法等 3 种方法；从由 3 种方法制造的铝包钢线的质量看，在架空输电线路上应用都是适用的，至少在我国由圆铝线一次成型压接法制造的铝包钢线已有 30 多年的使用史，自 20 世纪 70 年代到 80 年代中，此种铝包钢线已在 17 条早期建设的大跨越线路上运行，其中在我国第一条 2000m 级南京燕子矶长江大跨越工程中在导、地线上都使用了铝包钢线，该种铝包钢导线一直运行至今，已有 30 年的历史。从铝包钢线制造方法的发展看，摩擦挤压法最有竞争力，它生产率比较高，双金属杆可用压力模拉线，可实现线的规格多种化，电导率和强度调节的适用性强。

（1）粉末冶金法。20 世纪 50 年代末，美国用粉末冶金法制造铝包钢杆，然后在国际上首次用压力模和肥皂粉（干润滑）实现钢包铝双金属的同步变形拉线。粉末冶金法铝包钢杆制造工艺流程如图 3.6-2 所示。生产线通过贮线器实行对焊连续放线，经校直机两向校直（主动校直轮直径 127～152mm），校直后用非接触式仪器测定直径，喷砂表面清理，由三个互成 120°的抛砂轮抛出砂粒，喷砂机出口有三个钢丝刷，以清除表面残留物，铝粉在包复机上通过磁铁除去铁屑、经管子和振动器送入喂粉器（带有旋转螺杆机构），钢盘条从喂粉机的轴向中心通过，由于旋转螺杆机构的推进作用，将铝粉从一个长槽中输出全部包复在钢盘条的周围，喂粉器长槽的嘴部与四辊机轧辊外形相配，第一个四辊轧机的孔型如图 3.6-3 所示，包复在钢芯上的铝粉存在四个“耳子”，在下工序烧结时铝粉中存在的气体从此处跑掉，烧结处理用无保护气体的高频感应加热，用红外测温仪测温，如烧结温度太高产生铝钢金属间化合物，致使拉线脆断，第二、第三个四辊轧机的设计与第一个相同，第二、第三机架的轧辊互成 45°，包复件用辊式模整形后原来的“耳子”已被压回去，那里的铝层密度与其他处相同，绕杆后的每捆杆重 317～635kg。

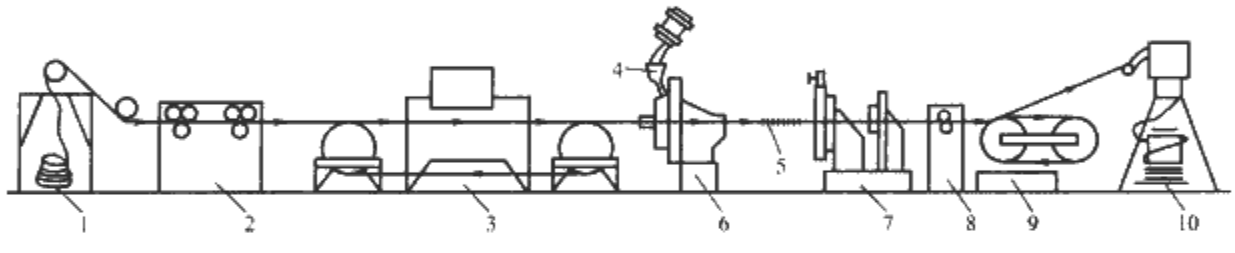


图 3.6-2　粉末冶金法铝包钢杆工艺流程

1—放钢杆；2—两向校直机；3　喷砂清理机；4—喂铝粉器；5—高频感应加热；6—第一次压紧机架；7—第二、三压缩机架；8—辊式模；9　牵引轮；10—绕杆机

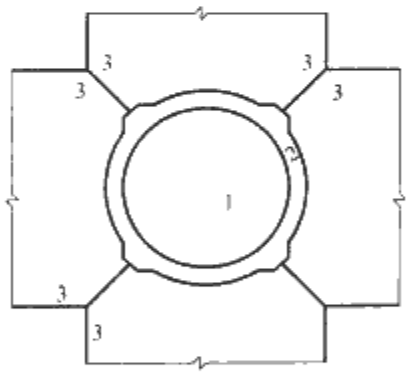


图 3.6-3　铝包钢铝粉包复机轧辊孔型

（第一个四辊轧机的孔型）

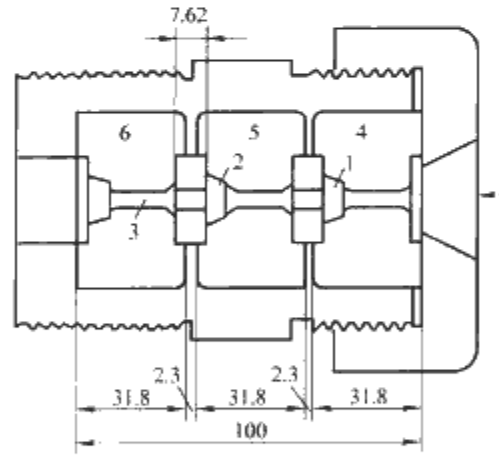
1—钢芯；2—铝层；3　轧辊

铝包钢杆用肥皂粉润滑的压力模拉线，按 1963 年美国专利（专利号 3080962）已获得应用。采用硬脂酸钙肥皂粉加二硫化钼（相当于脂肪量的 40%）的润滑剂，这种润滑剂粒子很细（比拉钢丝的润滑剂细）。由于干拉和在较大的总压缩率下拉线，所以控制线温很重要。每道模子的压缩率限制在 21%以下，线径与变形模工作角的关系如表 3.6-3 所示。6 模拉线机的出线速度为 5～5.6m/s。

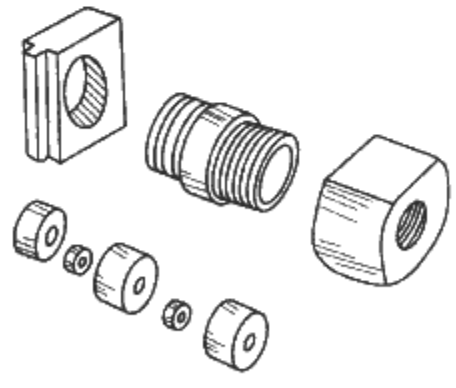
表 3.6-3　　线径与工作角的关系

线径（mm）	变形模工作角（°）
7.34～10.92	8
4.62～9.14	7
4.62 及以下	6

压力模组合体的结构如图 3.6-4～图 3.6-8 所示。铝包



(a)

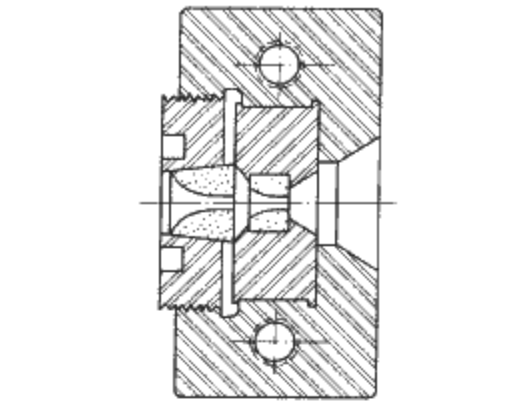


(b)

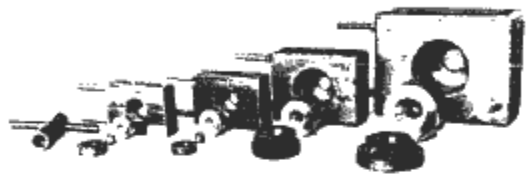
图 3.6-4　美国 Copper Weld 公司拉铝包钢线用的压力模组合体及主要组成部件

（a）压力模组合体；（b）主要组成部件

1、2—建立压力；3—变形；4、5—增压模；6—碳化钨变形模



(a)



(b)

图 3.6-5 冷却式压力模组合体和美国“Reishous”结构及其主要组成部件

(a) 冷却式压力模组合体；(b) 美国“Reishous”结构及其主要组成部件

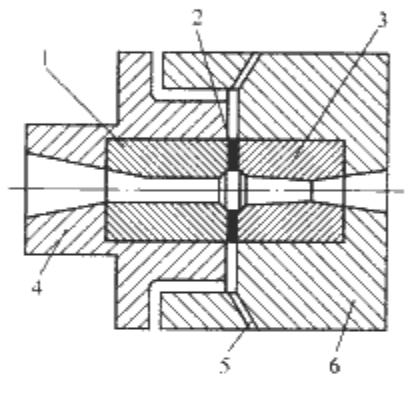


图 3.6-6 用肥皂润滑剂的压力模组合体

(英国钢铁研究所 BISRA 结构)

1—硬质合金增压模；2—高压密封；3—变形模；4—增压嘴；5—防裂泄漏；6 出口模

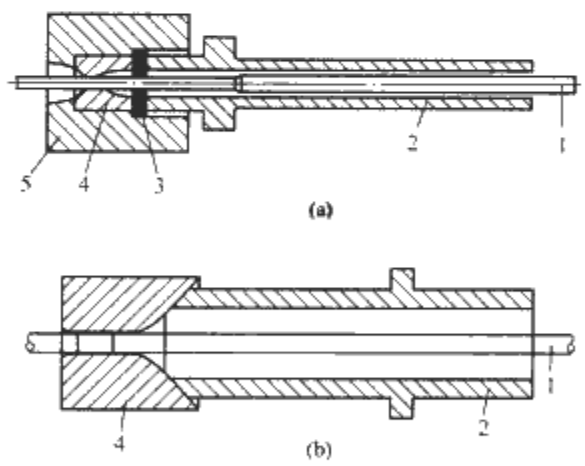


图 3.6-7 压力模组合体

(a) “Christopherson”结构；(b) 简单结构

1—线材；2—增压管；3 密封；4 变形模；5—模座

钢杆用肥皂粉的压力模拉线，早在 1963 年按美国专利 3080962 已获得应用。所谓压力模及其组合体主要由增压通道（增压管或增压模）和变形模组成，肥皂粉在线速带动下进入增压通道，在压力和温度作用下黏度发生变化，润滑的压力始于增压通道内，直到变形模口，此处的压力应大于被拉金属的屈伏限极，由此润滑剂在变形模中将模壁和线的表面隔离开来，达到“流体动力润滑”的状态（而不是边界润滑的状态），最终在拉出线的表面上残留着一层均匀的润滑

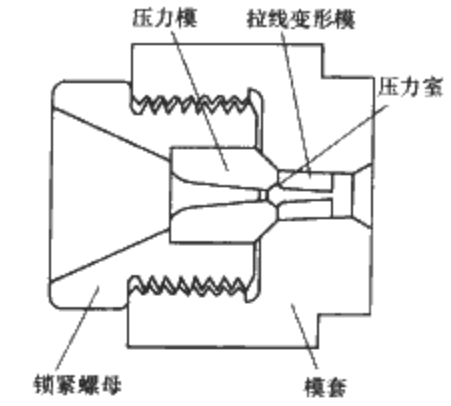


图 3.6-8 拉铝合金线用的可更换式压力模组合体

膜。据理论研究可定性地认为，润滑剂传递在线上的压力正比于进入模子中线材的速度、润滑剂的黏度和增压通道的长度，反比于线材和增压通道直径之差的平方。在设计压力模组合体时，虽然在变形模入口处的压力和拉出线表面上润滑膜的厚可以计算，但误差较大，最终压力模组合体的结构和尺寸还需通过试验来验证，以获得最佳的效果，而且结构应轻巧、操作方便。至于计算结果与实际相比误差大的原因，主要在于：当用肥皂粉作为润滑剂时，影响因素是比较复杂的。因为肥皂的工艺性能（肥皂的性质、粒度及混合搭配、酸或碱度、种类和软或硬等，一般地说，在给定的条件下，所用的肥皂越软，其压力和润滑剂的流量也越低）在拉线时受到了一定的影响。很显然，肥皂在压力和温度的作用下，在模子中或在增压通道中变成了液体，这样它的流动机理才能基本上隶属于流体动力学的规律；此外，如图 3.6-9 所示，在压力模组合体中润滑剂的压力是变化的。它受到入口角、引导间隙、压力室、变形模工作角和定径区的影响。研究表明：在使用肥皂的情况下，在压力模和进入线之间的间隙大小对流体动压力的建立具有重要的影响。在润滑剂中建立压力主要是在压力模圆柱形的引导部分的区域里发生的，也即在压力模和变形模之间的压力室的长度相对起着不重要的作用。

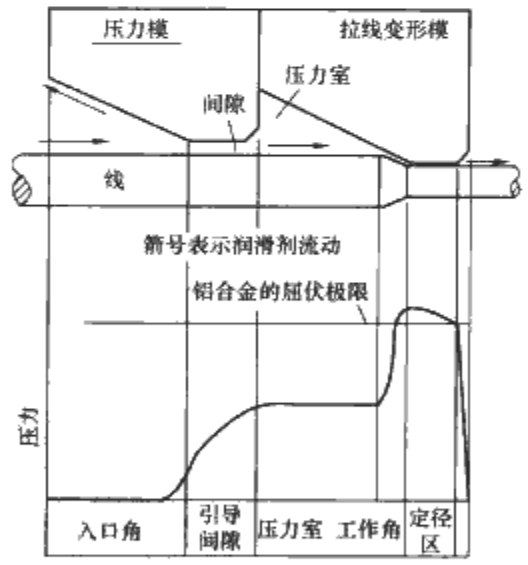


图 3.6-9 拉铝合金线时在压力模组合体中润滑剂压力的变化

(6201 高强度铝合金的屈伏极限为 175MPa)

经实践证明，采用肥皂粉干润滑在压力模组合体中可达到“流体动力润滑”状态，但到目前为止采用液体的湿润滑，还未获得工业的应用，尚待继续研究、开发。

(2) 圆铝线一次成型压接法。圆铝线一次成型压接法是于 20 世纪 60 年代中由上海电缆研究所和原湘潭电缆厂合作自主研发的制造铝包钢线的一种方法，我国第一条铝包钢线生产线于 1972 年在湘潭电缆厂投入生产。该方法的工艺流程如图 3.6-10 所示。原材料为普通的或高强度镀锌钢线和

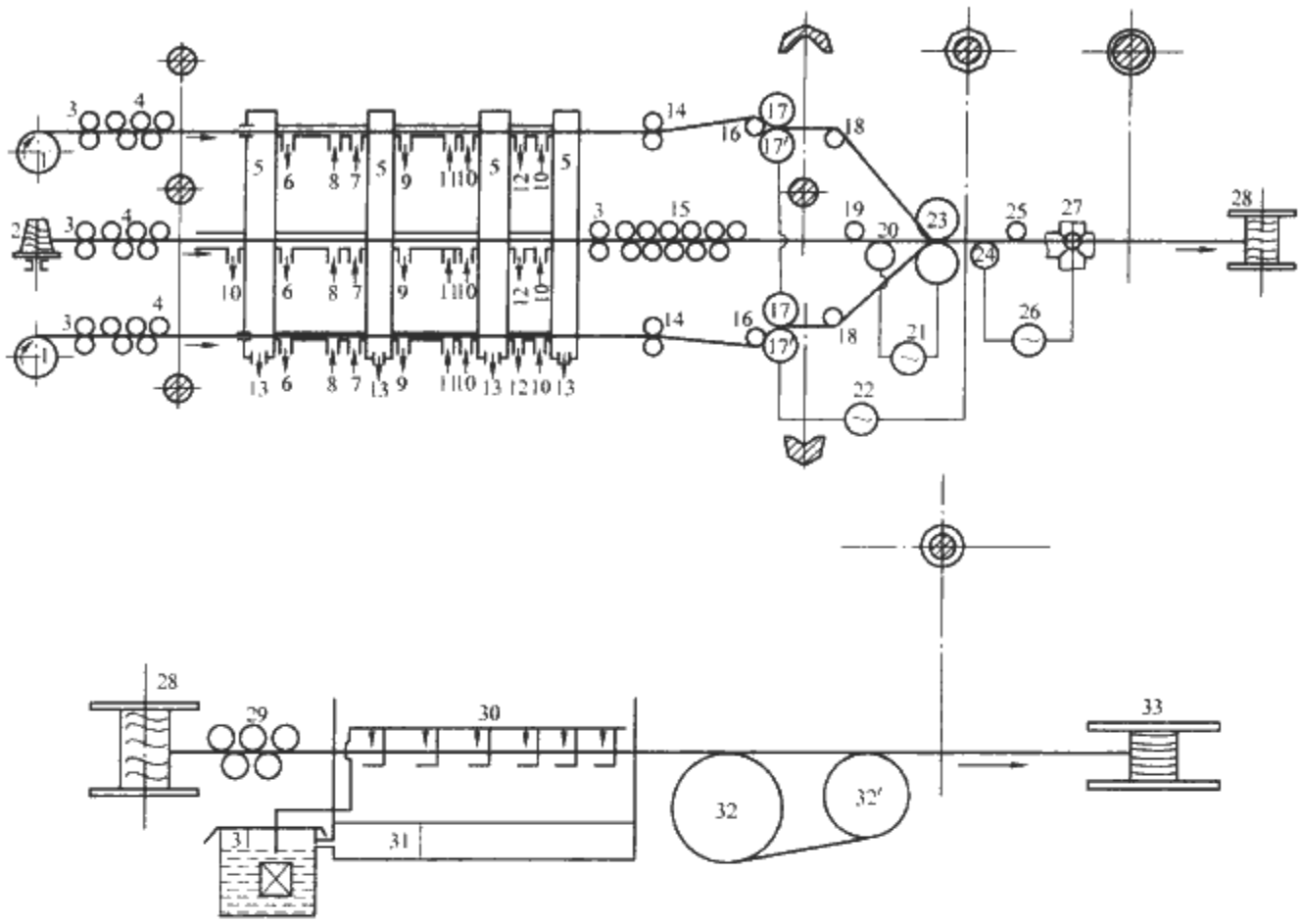


图 3.6-10　圆铝线一次成型压接法生产线

1—铝线；2—放镀锌钢线；3—平导轮；4—立导轮；5—回液箱；6—回碱管；7—进碱管；8—停车时进冷水冲碱液；9　回水管；10—进蒸汽管；11—进冷水管；12—回汽管；13—回液管；14—胶木平导轮；15—立轮校直；16—成型圆线咬入导轮；17 及 17′—成型公辊和母辊；18—铝带张力轮；19—钢线导轮；20—钢线导电轮；21—钢线加热变压器及其调控部分；22—铝带加热变压器及其调控部分；23—第一次压合；24　轧件导电轮；25—张力轮；26—轧间加热变压器及其调控部分；27—互成 90°四辊轧机第二次压合；28—收绕铝包钢杆；29—校直导轮；30—剥皮模架及喷油管；31—回油过滤及循环系统；32 及 32′—主被动牵引轮；33—收线盘

导电用铝。在管道中将钢线和铝线进行连续碱洗、热水洗和蒸汽冲洗，改革了历来沿用的槽式清洗法。用单向圆柱面被动轮校直钢线。经清洗的两根铝线各通过一对成型辊压成所需的成型铝带，然后两根成型铝带加一根钢线通过加热进行第一次和第二次压合，整个孔型系统如图 3.6-11 所示，这套孔型系统的特点是钢、铝延伸系数小，轧件咬入稳定，铝的利用率可增加到 70%，超过了国外同类压接法制造铝包钢线时铝利用率的水平。国外采用铝带渐变形的办法包复钢芯，而我国采用直接由圆铝线一次压型的新方法，这样简化了工艺和设备，并且在第一次压合时咬入比较稳定和可调控成品线的同心度，此外，圆铝线供应方便。第一次压合用两辊式压合机，辊径 300mm，上、下辊都进行了水内冷和通电加热铝及钢线，对轧辊的加热是很重要的，因为它影响钢、铝结合。第二次压合用四辊式轧机，它具有压力均匀、钢芯椭圆度小，产品同心度有保证的优点。加热对钢、铝结合有重要的影响，对成型铝带、镀锌钢线和轧件的控温范围分别为 350℃（2.5mm 铝线）、400℃（3.0mm 镀锌钢线）和 360～380℃，三个温度互相影响，可互有变化。由第二次压合，轧出的铝包钢杆，通过数个连续剥皮模（见图 3.6-12）整形后达到所需尺寸的成品铝包钢线。该种方法的创新点在于管道式连续清洗、圆铝线一次成型及第一、第二次压合的孔型系统，其缺点是因不能用压力模拉线，所以铝包钢线规格的多样化受到限制，而且电导率和强度的可调节范围也受到影响。

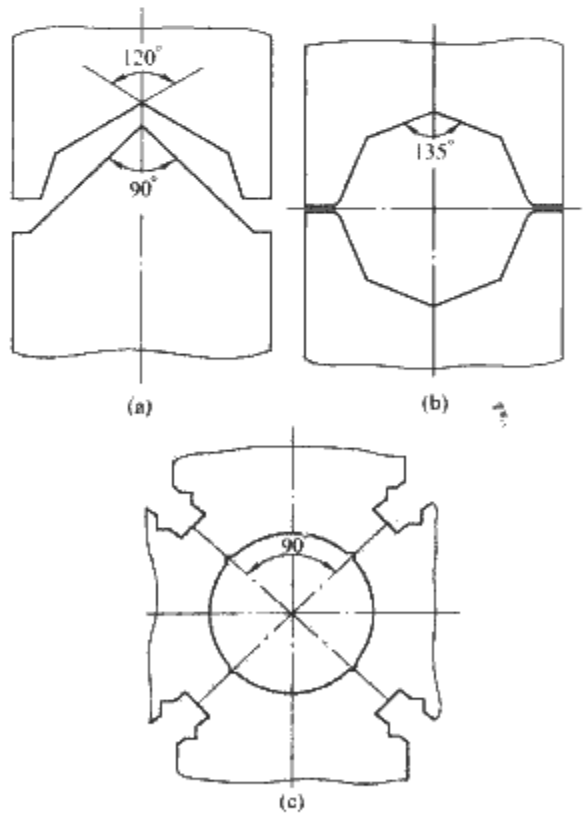


图 3.6-11　圆铝线一次成型、第一次和第二次压合孔型系统

（a）圆铝线一次成型孔型；（b）第一次压合两辊轧机孔型；（c）第二次压合四辊机孔型

（3）摩擦挤压法（Conform 挤压法）。自 20 世纪 80 年代摩擦连续挤压技术及其“Conform”连续挤压机和采用压力模拉制的双金属同步拉线机引入我国电缆行业以来，已获得了广泛的应用。此后，大连交通大学等单位研制的国产连续包覆生产线，也在我国推广应用，并且将该种技术发展应用于连续挤压铜型材，也获得了应用。摩擦连续挤压技术用于生产铝包钢线是目前国内外比较先进的技术。在国内目前比较完整的铝包钢线的生产工艺流程如图 3.6-13 所示。铝包钢线连续挤压包复生产线如图 3.6-14 所示，其中连续挤压包复用的单轮双槽 Conform 机如图 3.6-15 所示。

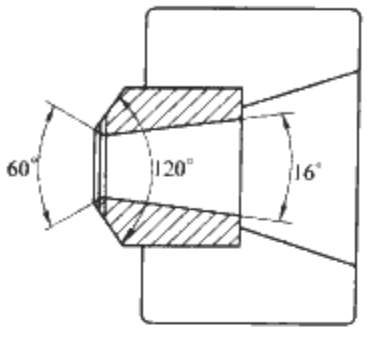


图 3.6-12 剥皮模

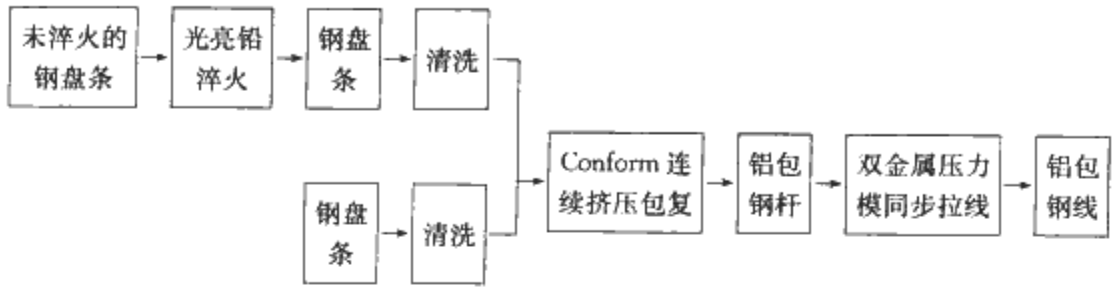


图 3.6-13 铝包钢线生产工艺流程

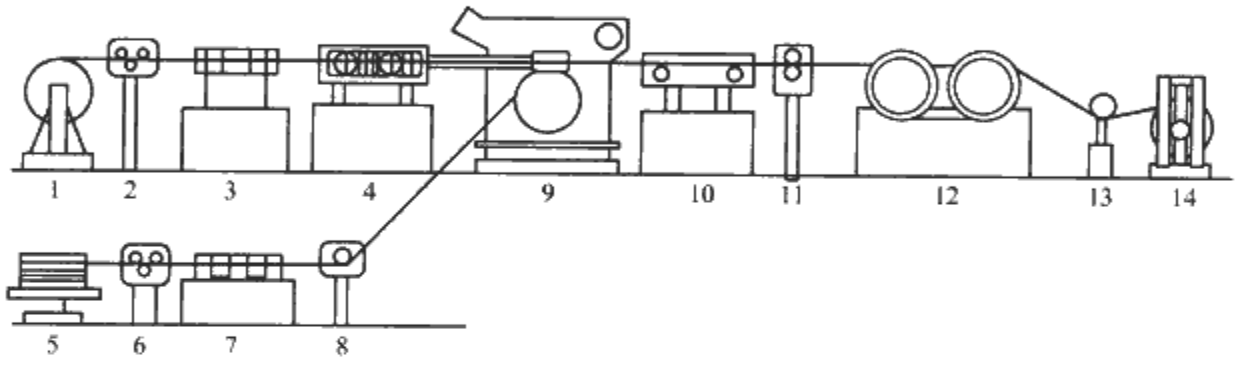


图 3.6-14 铝包钢线连续挤压包覆生产线示意图

1—张力放线；2—钢丝矫直；3—钢丝清洗；4—钢丝加热；5—铝杆放线；6—铝杆矫直；7—铝杆清洗；8—导向架；9—挤压包覆机；10—产品冷却；11—计米装置；12—绞盘牵引；13、14—收排线机

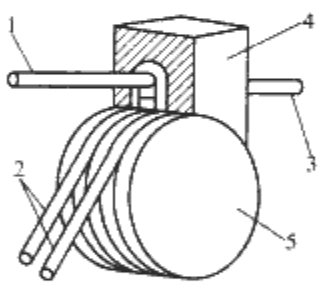


图 3.6-15 单轮双槽“Conform”机结构示意图

1—钢线；2—铝杆；3—铝包钢杆；4—腔体；5—挤压轮

钢盘条的原始组织很重要，应为索氏体，如有脆性相存在，易于引起脆断。光亮铅淬火的目的在于清除钢盘条上的氧化物油脂、污物等，以获得光亮的表面，有利于钢、铝结合，为此保证生产过程的顺利和产品质量，此外，通过对淬火后钢盘条表面的钝化处理可减少钢盘条的二次氧化，保证在一个星期的时效内，淬火后的钢盘条可以直接用于包复。钢盘条的表面清洗，以保证在包复铝以前表面必须清洁。高压涡流清洗法是清洗的方法之一，这是一种集机械和化学联合作用的清洗方法，清洗装置由高压泵和形成高压涡流的清洗头构成，化学清洗液在高压作用下，在清洗头中形成高速高压涡流，造成钢盘条强烈振动，使盘条与清洗头表面形成碰撞摩擦，达到机械除锈作用。另一方面，化学除锈液具有较好的化学除锈去污作用，机械振动摩擦强化了化学清洗作用，但该方法对钢盘条的运行速度有一定限制，速度过快影响清洗效果。钢盘条的加热与保护是在挤压包复前必须准备的状态，因为铝挤压包复时的温度为 400～500℃，要求盘条预热到一定温度方能实现包铝；在加热过程中为防盘条的氧化，一般采用纯度为 99%以上的氮气进行保护。铝杆的清洗方法较多，如钢刷机械清洗、超声波水剂清洗、钢刷—清洗剂联合清洗、高压涡流清洗和钢刷—高压涡流联合清洗等。高压涡流清洗法同样适用于清洗铝杆，清洗剂一般选用氢氧化钠。钢刷—高压涡流联合清洗法，当铝杆污染程度较重时，可采用此法，铝杆首先由钢刷除去氧化膜和硬质污物后，再经高压涡流清洗，清洗效果更加显著。经预处理的钢和铝，在连续挤压包复机中完成钢、铝复合过程。在钢盘条的包铝过程中，要求保持一定运动速度和在张力下穿过模腔，处于塑性流动的铝挤入模腔直接包复在钢盘条上，这时铝的温度可达 500℃左右，挤压应力达 1000MPa 以上，在这样的高温高压作用下，钢、铝间形成良好的结合。在挤压包复过程中铝的变形温度、挤压轮转速、钢盘条的预热温度、钢盘条速度和钢盘条张力等决定了铝包钢线的质量和性能。铝包钢杆在双金属压力模同步变形拉线上进行拉线，要使钢、铝同步，并按等比实现拉伸变形，靠的是压力模，也即在压力模中必须处于流体动力润滑状态，使变形模模壁和线的表面及润滑膜完全隔离开来，才能实现软铝和硬钢的同步变形，这是关键性的内在条件。此外，拉线机的每个鼓轮应是独立调速的非滑动直线式拉线机，以避免铝包钢拉线时的扭转和铝层与鼓轮之间的滑动而引起的磨损。有关压力模拉线的原理、模具结构和影响因素等已在前面（本章）作了介绍，在此不再赘述。铝包钢线拉伸，一般总压缩率控制在 80%以内，每个道次的压缩通常小于 20%～21%，见表 3.6-4。

表 3.6-4　　铝包钢线拉伸时各道次压缩率举例

道　次	1	2	3	4	5	6	7	8
压缩率（%）	20	19	19	18	18	17	17	16

1.1.3　铝包钢线的标准及性能

我国电工用铝包钢线的现行标准 GB/T 17937—1999 等同采用国际电工委员会（IEC）标准 IEC 61232—1993。标准规定有 LB1、LB2、LB3 和 LB4 四个等级，其相应的电导率为 20.3%、27%、30%和 40%IACS。LB1 等级的铝包钢线按其抗拉强度分为 A、B 两种型式。铝包钢线的密度、标称直径偏差、最小铝层厚度、抗拉强度、1%伸长时应力和电阻率如表 3.6-5～表 3.6-8 所示。铝包钢线断裂后的伸长率应不小于 1%或断裂时总的伸长率不小于 1.5%；铝包钢线的扭转性能应经受不少于 20 次的扭转而不断裂；成品铝包钢线不应有任何类型的接头。在拉制成品线前的坯杆上允许有接头，这种接头应符合表 3.6-7 的要求，有接头的成品线试样，其抗拉强度应不小于无接头的成品线抗拉强度的 80%，并且大于表 3.6-8 规定的最小值的 90%。成品线接头部分不要求进行伸长率、扭转和 1%伸长时的应力试验。为了便于设计计算，对铝包钢线的有关参数示出在表 3.6-9～表 3.6-13 中。对铝包钢线电导率的计算，一般规定按 61%IACS 的铝和 9%IACS 的钢而设计的。例如，LB3 设计的电导率为：铝（61%IACS×0.43）＋钢（9%IACS×0.57）＝31.36%IACS。考虑了误差，最小电导率规定为 30%IACS（57.47nΩ·m）。如果认为铝层是导体的导电部分，铝包钢线的电阻可根据表 3.6-10 的铝截面积和 61%IACS 电导率计算。根据这一点，铝包钢线（LB）“带钢电导率”和“不带钢电导率”之间的关系如表 3.6-11 所示。铝包钢线的密度按铝为 2.7 g/cm³，钢为 7.8g/cm³ 及其截面比计算出来的。LB1A 型的标称密度按 ASTM B415/B502 的规定。

表 3.6-5　　铝包钢线标称密度

等　级	型　式	20℃时标称密度（g/cm³）
LB1	A	6.59
	B	6.53
LB2	—	5.91
LB3	—	5.61
LB4	—	4.64

表 3.6-6　　铝包钢线直径偏差

标称直径（mm）	偏　差
2.67 及以上	±1.5%
2.67 以下	±0.04mm

表 3.6-7　　最小铝层厚度

等　级	最小铝层厚度
LB1	标称直径 1.8mm 以下，8%铝包钢线标称半径 标称直径 1.8mm 及以上，10%铝包钢线标称半径
LB2	14%铝包钢线标称半径
LB3	15%铝包钢线标称半径
LB4	25%铝包钢线标称半径

表 3.6-8　　铝包钢线的抗拉强度和电阻率要求

等级	型式	标称直径（mm）	抗拉强度最小值（MPa）	1%伸长时的应力最小值（MPa）	20℃时的电阻率最大值（nΩ·m）
LB1	A	1.24<d≤3.25	1340	1200	84.80（对应于 20.3% IACS 电导率）
		3.25<d≤3.45	1310	1180	
		3.45<d≤3.65	1270	1140	
		3.65<d≤3.95	1250	1100	
		3.95<d≤4.10	1210	1100	
		4.10<d≤4.40	1180	1070	
		4.40<d≤4.60	1140	1030	
		4.60<d≤4.75	1100	1000	
		4.75<d≤5.50	1070	1000	
	B	1.24<d≤5.50	1320	1100	
LB2	—	2.50<d≤5.00	1080	800	63.86（对应于 27% IACS 电导率）
LB3	—	2.50<d≤5.00	880	650	57.47（对应于 30% IACS 电导率）
LB4	—	2.50<d≤5.00	680	500	43.10（对应于 40% IACS 导电率）

表 3.6-9　　铝包钢线的等级

等　级	铝　层	电导率（%IACS）
LB1	标准	20.3
LB2	中等	27
LB3	中等	30
LB4	厚	40

注　工厂已可生产电导率为 14%IACS 的铝包钢线。

表 3.6-10　　铝和钢的标准比

等　级	铝　比（%）	钢　比（%）
LB1	25	75
LB2	37	63
LB3	43	57
LB4	62	38

表 3.6-11　　导　电　率

等级	电导率（%IACS）			
	铝	钢	LB 线	
			包括铝和钢的最小规定值	不包括钢电导率的计算值
LB1	61	9	20.3	15.3
LB2			27	22.6
LB3			30	26.2
LB4			40	37.8

表 3.6-12 铝层厚度（截面的标准铝层比率和最小铝层厚度之间的关系）

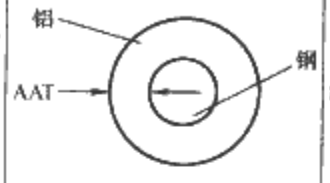
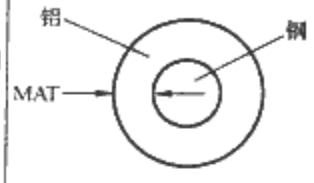
等级	截面的标准铝层比率（%）	平均铝层厚度：AAT（同心厚度） 平均铝层厚度：AAT（同心厚度） 	最小铝层厚度：MAT（同心度偏差） 最小铝层厚度：MAT（同心度偏差） 
LB1	25	13.4%铝包钢线标称半径	标称直径 1.80mm 以下 8%铝包钢线标称半径 标称直径 1.80mm 及以上 10%铝包钢线标称半径
LB2	37	20.5%铝包钢线标称半径	14%铝包钢线标称半径
LB3	43	24.5%铝包钢线标称半径	15%铝包钢线标称半径
LB4	62	38.4%铝包钢线标称半径	25%铝包钢线标称半径

表 3.6-13 铝包钢线的物理常数

等级	LB		LB2	LB3	LB4
型式	A	B			
最终弹性模数实测（GPa）	162	155	140	132	109
线膨胀系数（K^{-1}）	13.0×10^{-6}	12.6×10^{-6}	13.4×10^{-6}	13.8×10^{-6}	15.5×10^{-6}
定质量电阻温度系数（α）（K^{-1}）	0.003 6	0.003 6	0.003 6	0.003 8	0.004 0

铝包钢线在输电线路上作导、地线使用时，由于风激振动，对铝包钢线的疲劳性能是比较关注的，经研究表明：铝包层的厚度对铝包钢线的疲劳性能只有很小的，甚至没有影响，也即具有同样钢芯的任何铝包钢线具有相同的总体疲劳性能，可以忽略它们的铝层厚度及合金材料不同的影响，铝包钢线的疲劳性能主要取决于钢线的疲劳性能，换言之，如果芯线的直径规格化了，那么任一种软金属包钢线的 $S—N$（应力—循环次数）曲线都可换算成一条简单的曲线：钢线和铝包钢线两者的疲劳极限与抗拉强度特性曲线的型式几乎是相同的，要获得性能优良的铝包钢线，就要采用优良性能的钢线；钢芯表面的残余应力对疲劳性能的影响是很明显的，为此应采取措施消除残余应力；钢芯中的非金属夹杂物对疲劳性能有不良的影响，为了获得较好疲劳性能，应使用比较净化的钢盘条。图 3.6-16～图 3.6-18 示出了包层材料与包层厚度的影响。尽管不同包层厚度表现出不同的疲劳性能，但若将垂直轴线的弯曲应力用 $\sigma=16WI/\pi D^3$ 表示，并把它看作假定为包层无机械强度的钢线的表面应力，则其疲劳性能就可换算成一条简单的 $S\text{-}N$ 曲线（图 3.6-19）。图 3.6-20 示出了抗拉强度与疲劳极限之间的关系，图 3.6-21～图 3.6-23 示出了消除钢芯表面残余应力的措施及降低残余应力后的效果，也即轴向残余应力的减小有助于疲劳性能的改善。

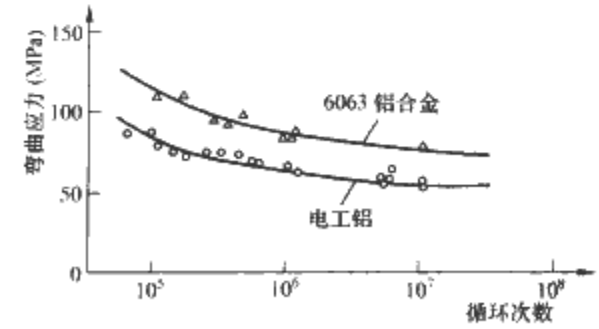


图 3.6-16 电工铝线和 6063 铝合金的疲劳性能（线径 3.2mm）

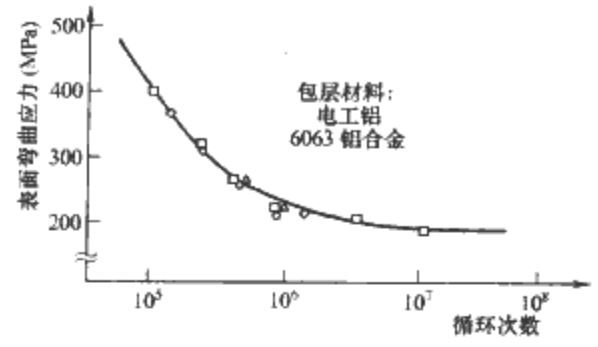


图 3.6-17 铝和铝合金包钢线（25%包层面积比率）疲劳性能（线径 3.2mm）

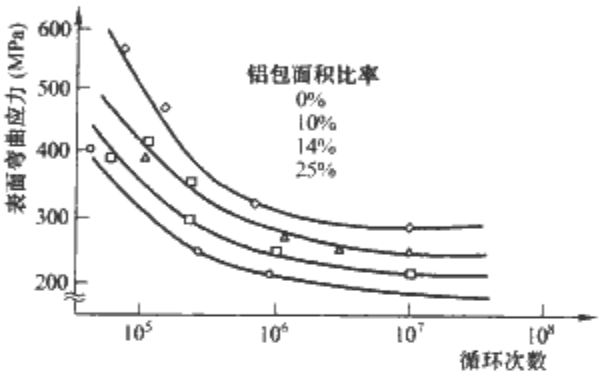


图 3.6-18 铝包层比率对铝包钢线疲劳性能的影响（线径 3.2mm）

钢芯成分：0.50%C、0.20%Si、0.75%Mn、0.035%P、0.020%S

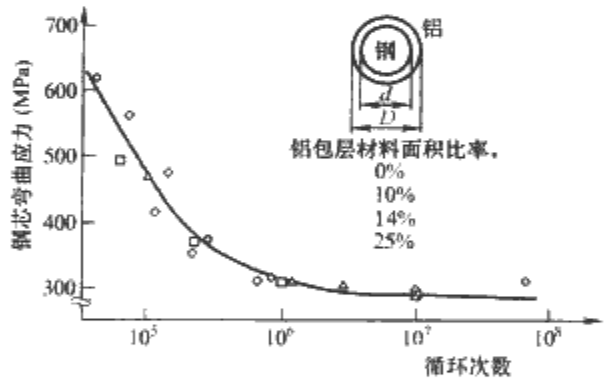


图 3.6-19 铝包钢线的疲劳性能（弯曲应力 $\sigma=16WI/\pi D^3$）（线径 3.2mm）

钢芯成分：0.50%C、0.20%Si、0.75%Mn、0.035%P、0.020%S

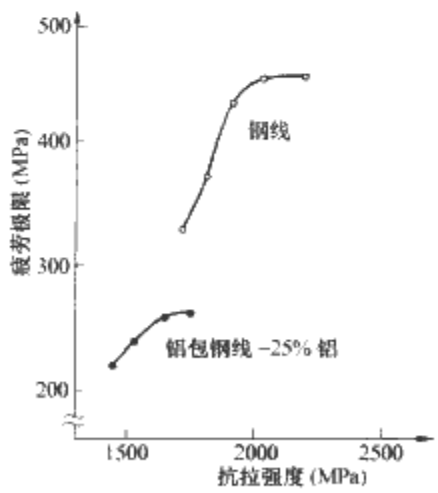


图 3.6-20 抗拉强度与疲劳极限的关系

钢芯和钢线的成分都为：0.72%C、0.020%Si、0.53%Mn、0.016%P、0.007%S

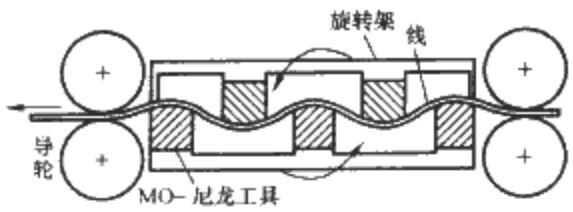


图 3.6-21　反复弯曲与轴向旋转相结合的应力消除原理

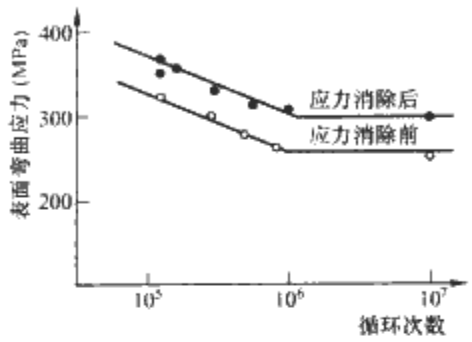


图 3.6-22　应力消除对铝包钢线疲劳性能的影响
钢芯成分：0.72%C、0.020%Si、0.53%Mn、0.016%P、0.007%S
铝包层：电工铝，25%面积比率

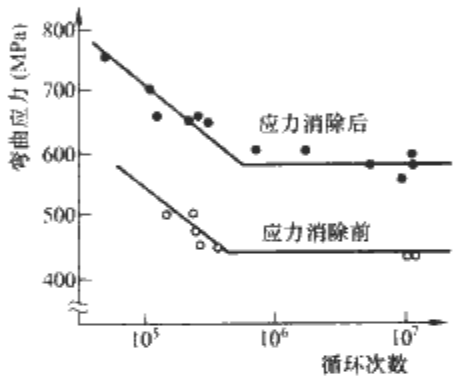


图 3.6-23　应力消除对钢线疲劳性能的影响
钢芯成分：0.72%C、0.020%Si、0.53%Mn、0.016%P、0.007%S

1.1.4　铝包钢线的应用

铝包钢线主要应用（包括经氧化着色后应用）如下：

（1）在架空电力线路方面——架空相导线、大跨越导线；光纤复合架空地线（OPGW）、良导体地线；杆、塔板线、电缆悬挂线；护线条、接续条。

（2）在通信线路方面——通信架空明线、电话电缆悬挂线、架空线路扳线。

（3）在铁路方面——电气化铁路接触网用载流或不载流承力索、吊弦线、通信线、信号线、扳线、通信电缆悬挂线。

（4）在公路运输方面——防护栏、安全网。

（5）在农用和其他方面——果园拉线、日用品挂件等。

1）铝包钢线在大跨越导线上的应用。

a. 南京燕子矶 220kV 长江大跨越架空输电工程。该工程用的铝包钢线，由原湘潭电缆厂生产（用圆铝线一次成型压接法制造），导线由上海电缆研究所设计和试验，导线绞制在上海电缆厂进行，导线制造长度 3km 以上。大跨越线路由华东电力设计院设计、线路主跨距 1933m 是我国第一条 2000m 级的大跨越线路，线路的导线和地线都采用了新型的高强度重防腐钢芯铝包钢绞线。该大跨越线路自 1976 年 9 月投入运行一直安全运行，至今已有 30 年的业绩。南京长江大跨越主航道跨越档线路如图 3.6-24 所示，线路所用导、地线结构如图 3.6-25、图 3.6-26 所示。表 3.6-14～表 3.6-21 示出了 GLGJ—38/19 型和 GLGJ—16/19 型导、地线的计算和试验结果。

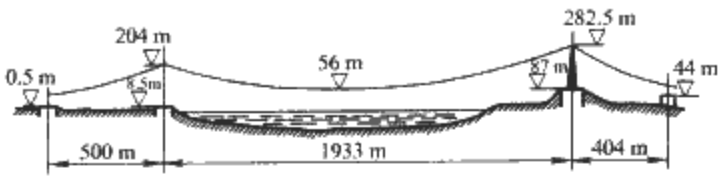


图 3.6-24　南京长江大跨越主航道跨越档线路示意图

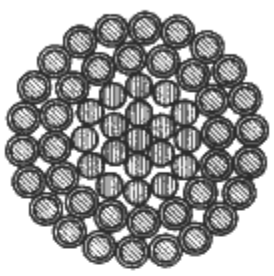


图 3.6-25　GLGJ—38/19 型钢芯铝包钢绞线（导线）

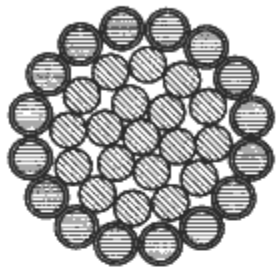


图 3.6-26　GLGJ—16/19 型钢芯铝包钢绞线（地线）

表 3.6-14　　导、地线结构尺寸及计算参数表

尺寸及参数	导　线	地　线
	GLGJ—38/19 型	GLGJ—16/19 型
结构(mm)	第 1 层铝包钢 16/3.7(3.0) 第 2 层铝包钢 22/3.7(3.0) 钢芯　19/3.2	铝包钢 16/3.7(3.0) 钢芯　19/3.2
外径(mm)	30.8	23.4
截面积　铝(mm^2)	140.0	58.9
钢(mm^2)	421.4	265.9
铝钢截面积比	0.333	0.222
铝包钢(mm^2)	408.6	172.0
钢(mm^2)	152.8	152.8
截面比	2.68	1.125
节距比	钢芯，第 1 层 19 第 2 层 17 铝包钢，第 1 层 13 第 2 层 11	钢芯，第 1 层 19 第 2 层 17 铝包钢　11
平均绞入系数 铝或铝包钢	1.027 0	1.028 9
钢	1.008 8	1.008 8
密度：铝包钢(kg/dm^3)	6.05	6.05
铝(kg/dm^3)	—	—
钢(kg/dm^3)	7.80	7.80
单位重量，无涂料(kg/km)	3740	2273
有涂料(kg/km)	3930	2380

表 3.6-15　　单线的机电性能

性　能	ϕ3.7(3.0)铝包钢线	ϕ3.2 钢线
抗拉强度($\times10^7$Pa)	96.7	160.0
伸长率(%)	1.70	5.5
弹性系数($\times10^7$Pa)	15 300	20 430
伸长 1%的应力($\times10^7$Pa)	—	132.7
电阻率 ρ_{20}($\Omega\cdot mm^2/m$)	0.060 05	0.199 5

表 3.6-16 铝包钢线的热强度试验结果

拉断力 / 温度	拉断力 φ3.7(3.0)铝包钢 (×9.8N)	拉断力 φ3.7(3.0)铝包钢 (%)
常温	1035	100
90°加热 100h	1017	98.2
100°加热 100h	1038	100
125°加热 100h	1033	99.7

表 3.6-17 GLGJ 型导、地线用 φ3.2mm 钢线疲劳试验结果

抗拉强度 (×10⁷Pa)	160	弯曲次数(万次)	1000
			1000
试样长度 (mm)	480	试样根数	3
			2
切线角 (°)	11.5	疲劳极限相当于抗拉强度 (%)	27.2
	12.0		
疲劳极限 (×10⁷Pa)	43.4		28.3
	45.2		

表 3.6-18 导、地线拉断力和拉断力单重比

导、地线参数	导线 GLGJ—38/19 型	地线 GLGJ—16/19 型
拉断力(×9.8N)		
实测平均值	60 300 (100)	39 600 (100)
不同计算式计算值	59 500 (98.7)	38 700 (97.7)
不同计算式计算值	58 400 (96.8)	36 600 (92.4)
拉断力单重比(有涂料)(km)	15.3	16.6

表 3.6-19 导、地线的弹性系数和线胀系数

导、地线参数	弹性系数(×10⁷Pa) GLGJ—38/19 型	弹性系数(×10⁷Pa) GLGJ—16/19 型	线胀系数(1×10⁻⁶/℃) GLGJ—38/19 型	线胀系数(1×10⁻⁶/℃) GLGJ—16/19 型
起始弹性系数	10 570	12 480		
运行弹性系数				
实测	13 940(100)	15 230(100)	12.7(100)	12.5(100)
计算	14 200(102)	15 000(98.5)	12.63(99.4)	12.28(98.2)

表 3.6-20 GLGJ—38/19 导线的实测截面及电气参数

实测单线直径(平均值)	
铝或铝包钢线(mm)	3.69
镀锌钢线(mm)	3.21
实测截面积	
铝或铝包钢线(mm²)	406.2
镀锌钢线(mm²)	153.8
直流电阻	
实测 R_{20}(Ω/km)	0.135(28.7)
计算 R_{20}(Ω/km)	0.136
实测 R_{100}(Ω/km)	0.177 4(27.5)
计算 R_{100}(Ω/km)	0.177 4
实测 R_{125}(Ω/km)	—
电阻温度系数(℃⁻¹)	0.003 93
实测交流电阻	
R_{ac100}(涂黑)(Ω/km)	0.288(24.8)
R_{ac125}(涂黑)(Ω/km)	—
载流量(环境温度 40℃，无风无日照)	
实测 A_{100}(亮)(A)	484
实测 A_{100}(黑)(A)	585(169)
计算 A_{100}(黑)(A)	583
实测 A_{125}(黑)(A)	—

表 3.6-21 GLGJ—38/19 导线载流量计算参数 (涂黑色防腐剂)

参数	GLGJ—38/19 型	备注
导线温度(℃)	100	在环境温度 40℃、风速 0.6m/s 和日照强度 1000W/m² 下计算的载流量
风速(m/s)	0.6	
辐射系数(m/s)	0.90	
吸热系数(m/s)	0.95	
日照强度(W/m²)	1000	
交流电阻 100℃(Ω/m)	0.288×10⁻³	
125℃	—	
辐射散热(W/m)	48.2	
对流散热(W/m)	86.0	
日照吸热(W/m)	29.3	
载流量 100℃(A)	604(160)	
125℃(A)	—	

注 重防腐高强度钢芯铝包钢绞线一产品出厂时为中防腐高强度钢芯铝包钢绞线，即内部各层均涂防腐剂，但导线外表面不涂。在施工架线后，再在导线表面上涂防腐剂。防腐剂由光亮油、天然橡胶、防老剂、聚异丁烯、炭黑、石棉粉、云母粉和氧化锌等材料组成。其滴点大于 150℃、110℃两周内不滴流，−50℃不裂开，吸湿性及水溶性均小于 1.0%，粘附性良好。

b. 湖北王家滩三峡工程±500kV 直流汉江大跨越架空输电工程。

三峡水电枢纽工程是世界上最大水电工程，标志着世界领先水平，其总装机容量为 1820 万 kW，将通过三条±500kV直流输电线路送往华东。龙泉至政平±500kV 线路是三峡送往华东第一回直流输电线路，输送容量为 300 万 kW，输送电流为 3000A，为世界之最。

龙泉至政平的±500kV 直流线路，全线路径长 890km，其中途经湖北王家滩跨越汉江，工程主跨距 1200m，整个耐张段为 2077m，具体布置，跨越方式：耐张—直线—直线—耐张；跨越档距：439m—1200m—438m。±500kV 王家滩汉江直流大跨越工程采用 4 分裂的铝包钢绞线，其型号为：AS—510（512）。在这种导线中采用直径 4.2mm，电导率为 30%IACS 的铝包钢线。这种铝包钢线不常用，因其铝层较厚，制造较难。铝包钢线用摩擦挤压法（Conform 挤压法）制造，铝包钢线和 AS—510 导线由新华金属制品有限公司生产，此大跨越输电工程于 2002 年投入运行。AS—510 用铝包钢线和绞线的性能如表 3.6-22 和表 3.6-23 所示。

表 3.6-22 AS—510 用铝包钢线的性能

项目	设计	工程实际要求	实测值
外径（mm）	4.20	4.20±1.5%	4.208
截面积（mm²）	13.85	13.85±0.41	13.91
单重（g/m）	77.70	77.70±2.3	78.02
最小铝层厚度（mm）	0.315	≥0.315	0.382
抗拉强度（MPa）	880	≥880	1025
伸长率（%）（断裂时，标距 250mm）	1.5	≥1.5	2.8
20℃时电阻率（Ω·mm²/m）	0.057 47	≤0.057 47	0.056 60
扭转（100D）（次）	20①	≥20①	35②

① 考核的要求是铝包钢线不断裂，铝层不脱离。

② 铝包钢线的性能符合 IEC 61232 所规定的厚铝层铝包钢线要求。

表 3.6-23　　±500kV 王家滩汉江大跨越 AS—510 铝包钢线性能

项　　目		设　计	工程实际要求	实测值
型号		AS—512	AS—512	AS—512
结构与直径(根/mm)		37/4.20	37/4.20±21.5%d	37/4.208
计算截面积 (mm^2)	铝	220.42	220.42	221.81
	钢	292.19	292.19	292.76
	总	512.61	512.61±2%	514.57
外径(mm)		29.4	29.4±2%	29.46
计算重量(kg/km)		2934.4	2934.4±2%	2944
计算拉断力(kN)		406	≥406	475
拉力重量比(km)		13.84	13.84	16.19
弹性模量①(MPa)		118 800	118 800±3000	115 800
20℃时直流电阻①(Ω/km)		0.114 3	≤0.114 3	0.111 9
线膨胀系数①($1\times10^{-6}℃^{-1}$)		13.8	13.8	14.8
振动疲劳		振动角：30′；振动频率：40±10Hz；　导线张力：25% RTS(即 42.65kN)；有效长度≥40m(实际 56m)；振动次数：3×10^7 次		3 根试样，导线不断股
10 年蠕变量①(mm/km)		导线张力：25%RTS 时		445

载流量②(A)					
Ⅰ	20～70℃，100℃	环境条件	Ⅰ(国内常用)	Ⅱ(IEC6 1597—95)	726；969
		风速	0.5m/s	1.0m/s	
Ⅰ	40～70℃，100℃	日照强度	1000W/m^2	900W/m^2	492；817
		导体表面吸收系数	0.9	0.5	
Ⅱ	20～70℃，100℃	导体辐射系数	0.9	0.6	885；1093
		环境温度	20；40℃	20；40℃	
Ⅱ	40～70℃，100℃	导体工作温度	70；100℃	70；100℃	652；929

① 工程实际需要的实测参考值。

② 工程实际需要的实测参考值，要求：环境温度 40℃，导体温度 100℃时的载流量≥750A。

经测试结果证明：AS-510 的全性能，包括总拉断力、弹性模数、直流电阻、热膨胀系数等均符合设计要求，导线经 3×10^7 次振而不断股、不损坏，保证足够长的导线寿命。

2）铝包钢线在光纤复合架空地线（OPGW）上的应用。自 20 世纪 80 年代开始，我国便在输电线路中采用光纤复合架空地线（OPGW），涵盖了 110kV、220kV、330kV、500kV 和 750kV 各电压等级的线路，特别对于新建的 110kV 及以上输电线路，规定应架设 OPGW，年用量从几百公里、几千公里，至现在已达 3 万 km 以上的水平。铝包钢线在 OPGW 中起着承受拉力和导电（允许通过短路电流）的双重作用是 OPGW 结构中的重要组件。OPGW 主要有两种结构，即铝管式和钢管式两种结构，通过调整铝包钢线的铝层厚度可以解决强度和电流容量的问题。在 OPGW 结构中的外层股线一般可以用铝包钢线或高强度铝镁硅合金线，但经大量的实践证明，在雷击多发区，由于雷击而引起外层股线的烧断，铝合金股线的几率要比铝包钢股线大得多。雷击熔蚀能量（雷击强度）和雷电先导“中和”形成的电弧高温是造成 OPGW 断股的外因，而 OPGW 单线熔点偏低是造成断股的内因。OPGW 除作为通信的通道外，主要用作避雷，在雷击时，瞬间电流强度很大，而作用在很小的截面上，致使 OPGW 的金属线外部发热至 600℃以上。因此，从抗雷击考虑，建议在雷击多发区用的光纤复合架空地线（OPGW）的外层股线应尽量采用外径不小于 3.0mm 的铝包钢线作为承力部件，且铝包钢线的电导率应在 20.3%～30%中选择。

光纤复合架空地线我国已制订机械行业标准（JB/T 8999—1999）。表 3.6-24 示出了部分铝管式 OPGW 的性能指标。图 3.6-27 为 500kV 主干线路用大芯数（48）光纤复合架空地线和大跨越工程用大芯数、高强度、大容量光纤复合架空地线的结构示意图。表 3.6-25、表 3.6-26 为 500kV 主干线路用 OPGW 和 500kV 大跨越工程用 OPGW 的主要技术参数；表 3.6-27 为铝包钢单线的技术参数。

表 3.6-24　　部分铝管式 OPGW 的性能指标

项　　目		OPGW—65	OPGW—75	OPGW—85	OPGW—100	OPGW—100	OPGW—110
结构	铝包钢线（根×mm）	14×2.05	12×2.50	12×2.60	12×2.90	12×2.90	12×2.50
	铝合金线（根×mm）	—	—	—	—	—	3×2.50
	铝管（外径/内径）(mm)	7.5/5.8	7.5/5.8	7.8/5.8	8.7/6.8	8.7/6.8	10/7.0
外径（mm）		11.60	12.50	13.00	14.50	14.50	14.50

续表

项目		OPGW—65	OPGW—75	OPGW—85	OPGW—100	OPGW—100	OPGW—110
截面积	铝包钢线（mm^2）	46.20	58.90	63.71	79.26	79.26	58.90
	铝合金线（mm^2）	—	—	—	—	—	14.70
	铝管（mm^2）	17.75	17.76	21.36	23.13	23.13	40.05
	总面积（mm^2）	64.95	76.66	85.07	102.39	102.39	113.65
单位重量（kg/km）		389	470	512	625	568	570
弹性模量（GPa）		132.5	122	122	125	110	112
热膨胀系数（$1\times10^{-6}℃^{-1}$）		14.6	14.0	14.0	13.9	14.8	15.6
总拉断力（kN）		60.0	72.5	78.5	97.5	78.8	74.0
（20℃）直流电阻（Ω/km）		0.86	0.754	0.663	0.571	0.486	0.39
长期工作温度（℃）		80	80	80	80	80	80
短期工作温度（℃）		200	250	250	250	250	250
铝包钢电导率（%IACS）		20.3	20.3	20.3	20.3	27	20.3
短路电流（I^2t）（$kA^2\cdot s$）		33.4	47.0	58.5	83.0	94.1	126
最大光纤数（芯）		24	24	24	48	48	48

注 OPGW－65～100 常用于 220kV 及以下的线路，而 OPGW－110 常用于 220～500kV 的线路。

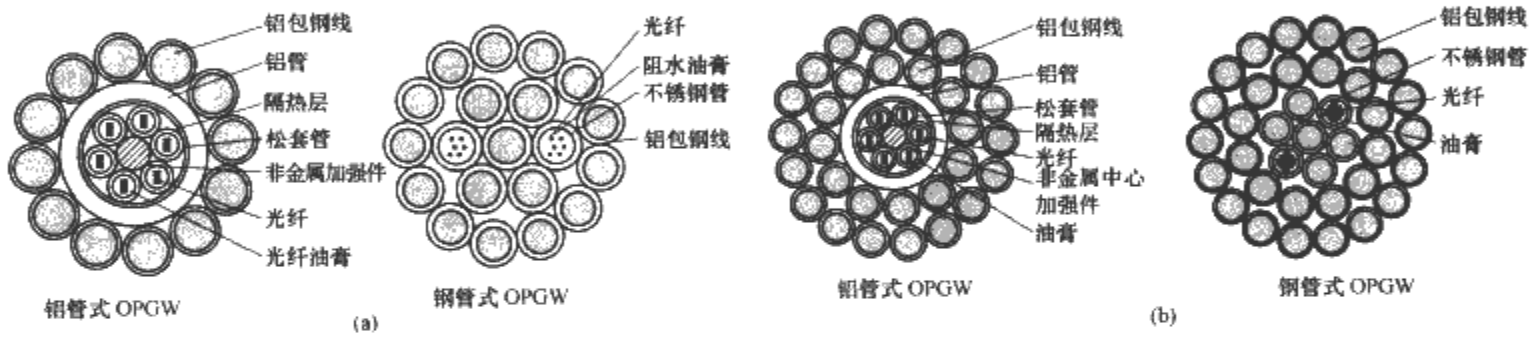


图 3.6-27 500kV 主干线路用大芯数（48 芯）和大跨越工程用 OPGW 结构示意图

（a）主干线用 OPGW 结构示意图；（b）大跨越用 OPGW 结构示意图

表 3.6-25 500kV 主干线路用 OPGW 主要技术参数

序号	项目		研究目标	设计参数	
				铝管式	钢管式
1	型号规格			OPGW—48B1—130 [102;147.5]	OPGW—48B1—135 [103;151.9]
2	光纤芯数		48	48	48
3	结构（mm）	铝包钢线		12/φ3.2	1/φ3.5＋4/φ3.2＋13/φ3.0
		铝合金线		—	—
		铝管		1/φ9.6：φ7.0	—
		光缆芯		1/φ6.9	2/φ3.2/[φ2.8]
4	铝包钢线电导率			27	35
5	截面积（mm^2）	铝包钢		96.5	134.7
		铝线		—	—
		铝管		33.9	—
		铝合金管		—	—
		总计		130.4	134.7
6	铝钢截面比			1.14	1.08
7	外径（mm）			16.0	16.0
8	光衰减（dB/km）		0.36	≤0.36(1310nm) ≤0.22(1550nm)	≤0.36(1310nm) ≤0.22(1550nm)
9	单位重量（kg/km）			702	724
10	额定抗张强度（RTS）（kN）		≥92.6	102.1	103.6
11	25% RTS（kN）			25.5	25.9
12	最大直流电阻（20℃）（Ω/km）			0.37	0.372

续表

序号	项　　目	研究目标	设　计　参　数	
			铝管式	钢管式
13	允许短路电流容量 I^2t （40～200℃） （20～200℃）（$kA^2 \cdot s$）	≥118.5	127.0 147.5	151.9 138.3
14	弹性模量（MPa）	106 000	120 700	122 000
15	热膨胀系数（$℃^{-1}$）		14.8×10^{-6}	14.5×10^{-6}
16	拉力单重比（km）		14.83	14.6

表 3.6-26　　500kV 大跨越工程用 OPGW 主要技术参数

序号	项　　目		研究目标	设　计　参　数	
				铝管式	钢管式
1	型号规格			OPGW—48B1—255 [290；424.9]	OPGW—48B1—248 [316；348.9]
2	光纤芯数		48	48	48
3	结构（mm）	铝包钢线 铝合金线 铝 管 光缆芯		12/φ3.1+ 18/φ3.1 — 1/［φ9.3×φ7.0］ 1/φ6.9	1/φ3.2（27%）+ 4/φ3.2（27%）+3.0（20.3%） — — 1/［φ3.0/φ2.6］
4	铝包钢线电导率			20.3	27 和 20.3
5	截面积（mm^2）	铝包钢线 铝　管 总面积		226.4 29.4 255.8	248.4 — 248.4
6	铝钢截面比			0.51	0.38
7	外径（mm）			21.7	21.2
8	光衰减（dB/km）		0.36	≤0.36 ≤0.22（1550nm）	≤0.36（1310nm） ≤0.22（1550nm）
9	单位重量（kg/km）			1622	1650
10	额定抗张强度（RTS）（kN）		≥245	290.9	316.6
11	25% RTS（kN）			72.7	79.2
12	最大直流电阻（20℃）（Ω/km）			0.27	0.333
13	允许短路电流容量（I^2t） （40～200℃） （20～200℃）（$kA^2 \cdot s$）		≥120	365.8 424.9	348.9 310.3
14	弹性模量（MPa）		135 200	150 900	158 800
15	热膨胀系数（$℃^{-1}$）			13.5×10^{-6}	13.1×10^{-6}
16	拉力单重比（km）			18.30	19.7

表 3.6-27　　铝包钢单丝技术参数

序号	项　　目	数　　值						
1	最小电导率（%IACS）	27	27	20.3	20.3	35	35	35
2	单丝标准直径（mm）	3.2	3.0	3.0	3.1	3.5	3.25	3.0
3	直径偏差（mm）	±1.5%	±1.5%	±1.5%	±1.5%	±1.5%	±1.5%	±1.5%
4	20℃最大电阻率（nΩ·m）	63.86	63.86	84.80	84.93	49.26	49.26	49.26
5	电阻温度系数（$℃^{-1}$）	0.003 6	0.003 6	0.003 6	0.003 6	0.003 8	0.003 8	0.003 8
6	耐热（$℃^{-1}$）	300	300	300	300	300	300	300
7	铝钢截面比	0.587	0.587	0.33	0.33	1.08	1.08	1.08
8	铝层最小厚度（mm）	0.22	0.21	0.15	0.21	0.35	0.325	0.3
9	最小极限抗拉强度（MPa）	1080	1080	1340	1340	810	810	810
10	1%伸长时最小抗拉强度（MPa）	800	800	1200	1200	590	590	590

续表

序号	项目	数值						
11	250mm 最小延伸率（%）	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
12	20℃时标称密度（g/cm³）	5.91	5.91	6.59	6.59	5.15	5.15	5.15
13	弹性模量（GPa）	140	140	162	162	122	122	122
14	线膨胀系数（℃⁻¹）	13.4×10^{-6}	13.4×10^{-6}	13.0×10^{-6}	13.0×10^{-6}	14.5×10^{-6}	14.5×10^{-6}	14.5×10^{-6}
15	破坏载荷（kN）	8.69	7.64	9.47	10.11	7.79	6.71	5.73
16	最小扭转次数（次）	≥20	≥20	≥20	≥20	≥20	≥20	≥20
17	标准截面积（mm²）	8.04	7.07	7.07	7.55	9.62	8.29	7.07

1.2 铜包铝线及铜包铝排（母线）

1.2.1 铜包铝线及其特点

铜包铝线是在一根圆铝线外均匀、连续、紧密地包复着一层铜的双金属导线。它兼有铜、铝两种金属的特点，因此铜包铝线是铜、铝两者的强强结合和强弱互补的又一种双金属导线。

（1）电导率、力学性能和柔软性比铜低，但比铝高，见表 3.6-28。

表 3.6-28 铜包铝线、铜线和铝线性能比较

性能			导体			
			电气用铝	电气用铜	铜包铝（10%）	铜包铝（15%）
铜面积比(%)			0	100	10	5
铜重量比(%)			0	100	26.8	36.8
物理性能	密度(20℃)		2.70	8.89	3.32	3.63
	线膨胀系数(20%)(℃⁻¹)		2.4×10^{-6}	1.7×10^{-6}	2.3×10^{-6}	2.2×10^{-6}
	电阻温度系数(0～100℃)(℃⁻¹)		0.004 0	0.003 9	0.004 0	0.004 0
	电导率(%IACS)	软	62	100	66	70
		硬	61	98	64	68
力学性能	抗拉强度(10MPa)	软	7～11	22～27	9～11	9～12
		硬	15～21	35～47	17～23	18～24
	屈服强度(10MPa)	软	2～3	6～8	2～4	2～4
		硬	12～17	30～43	15～20	16～21
	伸长率(%)	软	23～25	30～40	25～30	25～30
		硬	0.5～2.0	0.5～2.0	0.5～2.0	0.5～2.0
	弹性模数(10MPa)		6300	12 000	6900	7200
	硬度(维氏)	软	25	60	—	—
		硬	45	120	—	—

（2）重量轻，约为铜的 1/3，以标准的 10%铜包铝线为例，如表 3.6-29 所示。

表 3.6-29 10%铜包铝线与铜线性能比较

线种	铜厚度(%)	铜体积(%)	电导率(%)	密度(%)
铜包铝	ϕ2.5	10	64	37(3.3g/cm³)
铜	100	100	100	100(8.9g/cm³)

（3）生产成本比铜线低。在工频下应用时，如要求铜包铝线具有与铜线相同的电导率，比如，0.6kg 的铜包铝线，便相当于 1kg 铜线的用途；在高频下应用时，如要求具有相同的外径，比如，0.4kg 的铜包铝线相当于 1kg 铜线的用途。显而易见，在铜价飞涨、铜资源缺乏的世界，对铜包铝线的应用为以铝节铜（当然不是以铝代铜，该用铜的地方，还应用铜）和降低生产成本增加了驱动力。如果作母线应用时，在温升相同的情况下，15%铜包铝母线 0.5kg 相当于 1kg 铜母线的用途。

（4）耐腐蚀和连接性能与铜一样。因铜包铝线的表面是铜，它抗氧化、连接和安装性能与铜线相同。铜包铝线在通常的电力电缆上应用，采用卷边压接（图 3.6-28）可获得满意的效果，因为连续包着的铜层可完全地将每根股线封闭起来，而相对于对铝线的连接存在铜—铝或铝—铝的连接，那就要注意安装，以免产生不必要的麻烦。

（5）铜包铝线在 250℃下长期加热时，在铜—铝的接触界面上会产生脆性的 $CuAl_2$ 金属间化合物，这种化合物一旦达到某一厚度会影响线的加工性能和致使成品线伸长率和电导率的下降。据研究表明：铜和铝的扩散层（$CuAl_2$）约在 250℃下形成，扩散层的形成需要时间，但时间多少取决于温度，在 250℃的最高温度下，需要 3min，而在 320℃下，只需 50s。$CuAl_2$ 层的厚度取决于温度和时间，从使用实际考虑，在加工过程中只要正确制订退火工艺，使化合物层的厚度小于 2μm，对线性能不会产生不良的影响。

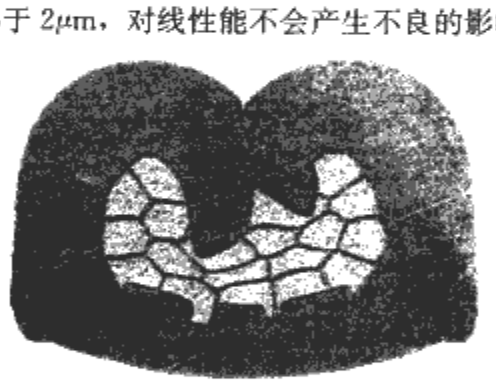


图 3.6-28 AWG 18（0.82mm²）含有 19 股铜包铝线电缆的卷边压接的横截面

（6）铜包铝线有别于镀铜铝线，往往给选用者造成混淆，两者的差别除表 3.6-1 所示的主要区别外，由电镀法生产的镀铜铝线，镀层性能较硬、导线经弯曲后铜层容易开裂、镀铜层与铝芯往往不同心，难于满足同轴电缆生产和使用的要求，并且电镀法生产速度慢，还有电镀液的三废处理问题。用电镀法生产镀铜铝线之所以难于推广应用，有一个重要的原因是难于解决铝氧化膜对铜和铝结合的阻碍问题。铜直接镀在铝上，两者结合甚差，往往需要采用一种或两种过渡镀层如锌、镍等，为此也设计了诸如氧化锌碱性溶液除氧化铝膜法、化学浸锌法、浸重金属盐法和阳极氧化法的前处理方案以及硫酸盐和焦磷酸盐镀铜方案等不同的镀制工艺，但结果都不甚满意。目前对这种方法基本上已被包复法所代替。

1.2.2 铜包铝线和铜包铝排（母线）的制造

在 20 世纪 30 年代制造铜包铝线以来，虽然曾用过铜管套铝杆的拉制法、双铜带加热轧制—冷拉线法（美国 Texas Instruments 公司）、连续纵包焊接—冷拉法和静液挤压法等许多方法，但目前国内、外都主要以连续纵包焊接—冷拉法

生产铜包铝线，而以静液挤压法生产铜包铝母线（排）。我国对铜包铝线的生产起步较晚，但目前的发展较快，这主要来自于铜价猛涨，铜资源缺乏的驱动力，所使用的生产方法与国外相类似，而且产品标准也基本上等同采用 ASTM B566—2004 标准。至于铜包铝母线（排）的产生至今尚属空白，其原因主要是大型的工艺装备问题，其次才是工艺问题。我国北京有色金属研究总院早先曾用 800t 静液挤压机试验了 5mm×28mm 的铜包铝排和直径 7.3mm×24m 长的铜包铝杆，后来又用 2000t 静液挤压机试验了 ϕ12.0mm 的 15%铜包铝杆，并冷拉到直径为 1.6mm 的铜包铝线。

（1）连续纵包焊接—冷拉法。连续纵包焊接－冷拉法制造的铜包铝线，铜、铝界面之间有着良好的冶金结合。标准产品的铜层厚度为 6.2%线材半径，其相应的电导率为 63.5%IACS。铜包铝线的生产过程如图 3.6-29 所示，在生产线上通过冷压使铜、铝之间建立初步的结合，获得铜包铝杆，然后经过拉线使这种结合进一步加强，获得铜包铝线。

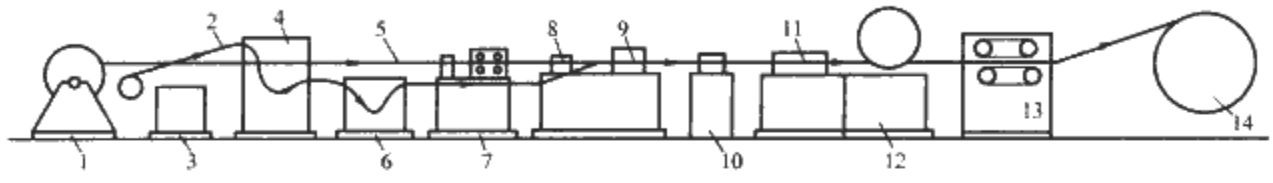


图 3.6-29　连续纵包焊接法制造铜包铝杆工艺流程

1—放铝杆；2—铜带；3—放铜带；4—铜带储存；5—铝杆；6—铜带溶剂清洗；7—铝杆校直；8—铝杆剥皮；9—刷铜带和管子成型；10—拉模；11—辊压；12—拖轮；13—履带式牵引；14—收杆

铝杆与铜带连续地进入包复生产线。铝杆先经一个模子拉到所需的尺寸，再通过两向校直，而后连续剥皮，铝杆剥皮机采用连续打屑装置。铜带先在有机溶剂的溶液中清洗，然后切边，根据剥皮后铝芯的直径，切到一定的宽度，接着用青铜刷将铜带与铝芯接触的面刷净。经剥皮和刷净的铝杆和铜带在惰性气体保护下进行管子成型。

当铜带包在铝芯的周围以后，在焊接室，通过三个钨极（氩气保护）实现连续焊接。三个电极有三套系统，第一个电极用于预热，第二、三个电极用于熔焊。焊缝宽度 1～2mm，焊缝深度刚好与管壁厚度相同，不能焊到铝上使铝熔化，以避免在铜、铝界面上形成脆性的金属化合物，故在焊好以后，铜、铝间是有一定间隙的。为保证焊接质量，铜带的边要切得整齐，并应除去边上的小缺口，否则在小缺口处焊不好就不能拉拔。焊接速度为 23m/min，在焊接过程中焊弧（直流）可通过潜望镜监视。采用涡流探伤仪检验焊缝的缺陷，如焊缝出现问题（如小洞等）时，可自动打出记号，以便在拉线时切去。

经焊接后的铜包铝坯，通过拉伸模，使铜管紧贴在铝芯上。这个拉伸模接近电极，采用油冷却，在铜管上如有小洞，冷却油就漏入小洞，其影响范围可达 10m 左右，这样必须在拉线时切除。

铜包铝坯经拉伸后进入双“它司”头辊压机经受压缩，以使铜、铝之间建立初步的结合。“它司”头由四个被动辊组成。第二个“它司”头的四个辊子与第一个“它司”头的四个辊子互成 45°，以使铜包铝坯受到均匀的压缩。压缩后的铜包铝杆，其典型的直径为 19.1mm，铜层厚 0.64mm。

辊压后的铜包铝杆通过履带式牵引装置和直径为 2m 的大牵引轮绕在直径为 2m 的收杆盘上。由于这时的铜包铝杆铜、铝结合只是初步的，所以必须要有较大的弯曲半径。为了实现连续收杆，采用两个盘子收杆。

连续纵包焊接生产线典型的生产速度为 21.3m/min，年生产能力达 4000～5000t。

铜包铝杆可在普通的铜拉线机上拉线，拉线时要注意避免急剧弯曲，在拉伸道次上的最大面积减缩率为 21%。铜拉线模通常也适用于拉铜包铝线，模子工作角为 16°，定径区长等于线径的 35%～40%。对直径 1.63mm 以上的导线采用碳化钨模，而小直径的导线使用钻石模。

铜包铝线通常以退火状态交货，光亮退火可在惰性或还原性气氛保护下的批量装料炉中进行，也可采用电阻式连续退火。

（2）静液挤压法与铜包铝排（母线）。静液挤压法主要用于生产铜包铝排，用户需要的大部分为 15%铜包铝排。该法亦可用于生产铜包铝杆，此种杆材由于长度受限，为此要用爆炸焊接法连接起来。

瑞典 ASEA 公司采用 4000t 卧式静液压机，压力缸设计压力为 1.4GPa，装料最大直径 ϕ170mm，坯重 90kg，理论产量每小时能挤 30 根，实际上每小时可挤 24 根，挤压比最大为 500∶1，铜包铝排的宽厚比最大为 12∶1，截面可达 40～1200mm^2，宽度为 6～100mm，厚度为 3～30mm。铜包铝杆直径 ϕ8～42mm，可供拉线使用。该设备可年产铜包铝排 5800t，其生产过程如图 3.6-30 所示。铝棒和铜管的一端各铣出锥面—铝棒和铜管表面去油脂—铜管退火—用气动推杆将铝棒装入铜管—铜管后端加一钢封头—运至静液挤压机挤压。

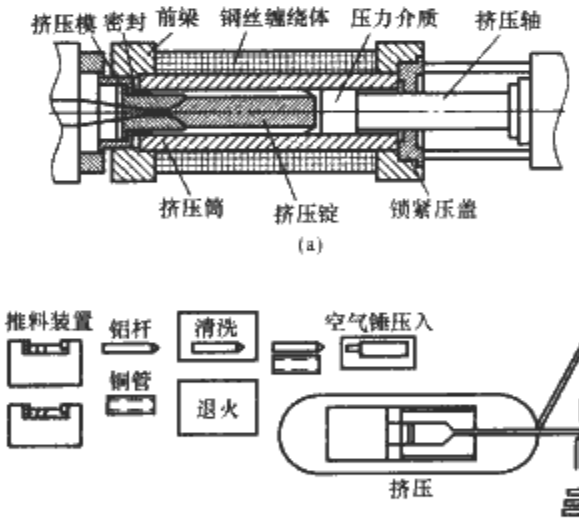


图 3.6-30　静液挤压铜包铝排和铜包铝杆生产过程

（a）静液挤压原理；（b）静液挤压工艺过程

使用铜包铝排有其特殊的优越性。虽然目前已有相当数量的铝排在使用，但连接面的处理是相当麻烦的，这就是铝排推广应用进展缓慢的原因之一。应用铜包铝排可完全解决上述问题，从而使用铝排的比例尚可大幅增加。

铜包铝排和铜排一样十分耐用，可进行弯曲和扭转加工，也可进行压孔、冲孔加工。由于它外层是铜，所以与铜

排一样耐蚀，容易电镀和连接。实验证明：在 80℃下连续使用 30 年，铜与铝结合面生成 $CuAl_2$ 合金层厚度仅为 1μm，没有任何影响。短路时温度为 250℃、持续时间 2s 和发生 1000 次的条件下，生成的 $CuAl_2$ 合金层厚度至多也只有 1μm 左右。

1.2.3 铜包铝线的标准及性能

我国电子行业铜包铝线标准（SJ/T 11223—2000）基本上等效采用美国 ASTM B566—2004 标准。在该标准中指明："本标准适用于作同轴电缆内导体及电气装备中电线电缆导体的铜包铝线"，事实上铜包铝线的使用延伸范围已涉及了作外导体的屏蔽编织线，视频线缆、电磁线、家用电器、家用布线、汽车布线、电力电缆和电子元器件等领域。目前，国内用户不仅需要直径 0.12mm，也希望有直径更细的铜包铝线。广东蕾胜超微线材股份有限公司已生产了直径 0.05mm 的铜包铝线，并已制订了企业标准。除铜包铝线外，根据用户需要也可生产铜包铝合金线，其中被铜包覆的铝合金含镁 0.8%，以提高线的强度，而且亦有利于改善拉线。总之，铜包铝线在扩大应用中正与细铝线和铜线进行竞争。

铜包铝线（代号 CCA）按铜层体积比和软硬状态的不同分为 4 个类别，即 10A—铜层体积比为 10%的软态铜包铝线、10H—铜层体积比为 10%的硬态铜包铝线、15A—铜层体积比为 15%的软态铜包铝线和 15H—铜层体积比为 15%的硬铜包铝线。铜层和铝芯的结合力和附着力是铜包铝线性能的基础，为此对结合力和附着力有明确的规定：

结合力——在结合力试验时，铜包铝线应被扭转三转，试件长度为线径的 15 倍，然后退扭同样的转数。起始的试件长度大于规定的长度是可以使用的，但扭转的次数应按比例增加。施加的扭转速度不是关键的。在此条件下，铜包铝线应没有裂痕或破裂。对铜包铝线的检查应在不超过放大 10 倍的情况下进行。

附着力——在附着力试验力时，铜包铝线应用任一方便的方法反复地弯曲到破断。在此条件下，铜包铝线应没有包复层的分离，如有分离是与良好的工业实践不相一致的。对铜包铝线的检验应在不超过放大 10 倍的情况下进行。

对铜包铝线的成品线应无接头或绞接头。铜包铝线标称直径及其抗拉强度和伸长率见表 3.6-30；在 20℃下的直流电阻率和标称密度如表 3.6-31 所示；同轴电缆常用铜包铝线的最薄铜层厚度和 5～100Hz 信号传输时的集肤深度计算结果见表 3.6-32；铜包铝线的铜层厚度和铜层体积比如表 3.6-33。铜包铝线的物理、力学性能，为便于分析比较，亦将铜、铝导体的相应性能同时列于表 3.6-34 中。铜包铝线的高温性能如图 3.6-31、图 3.6-32 所示，由图可以看出：当铜包铝线温度过高时，力学性能和导电性能急剧下降，这是由于铜、铝界面产生了较厚的金属间化合物。这种化合物性脆、电阻大，因此在加热处理和使用中必须注意。特别对于 0.5mm 以下的细线更要注意。据图 3.6-33（a）可以判断，铜包铝线在 150℃下长期使用，其寿命约达 50 年。关于铜包铝线的热处理温度，在 150～180℃长期加热处理，其特性仍不变坏。可是，当超过 250℃时，加热时间必须加以限制。当温度为 300℃时，保温 5h 铜、铝界面上便生长 2μm 厚的金属间化合物［见图 3.6-33（b）］。加热时金属间化合物的厚度可由下式计算：

$$t = a\sqrt{s}$$

式中：t 为生成的化合物厚度，μm；a 为经验系数（与加热温度有关）；s 为加热时间，s。

表 3.6-30 铜包铝线的标称直径及其抗拉强度和伸长率

标称直径 (mm)	抗拉强度(MPa)		伸长率(%)	
	H 类别(最小)	A 类别(最大)	H 类别(最小)	A 类别(最小)
8.25	110	138	1.5	15
7.35	110	138	1.5	15
6.54	124	138	1.5	15
5.83	138	138	1.5	15
5.20	152	138	1.5	15
4.62	159	138	1.5	15
4.12	166	138	1.5	15
3.67	172	138	1.5	15
3.26	179	138	1.0	15
2.91	186	138	1.0	15
2.59	193	138	1.0	15
2.30	200	138	1.0	15
2.05	205	138	1.0	15
1.83	205	138	1.0	15
1.63	205	138	1.0	15
1.45	205	138	1.0	15
1.29	205	138	1.0	15
1.15	205	138	1.0	15
1.02	205	138	1.0	15
0.912	205	138	1.0	15
0.813	205	138	1.0	15
0.724	205	138	1.0	15
0.643	205	138	1.0	15
0.574	205	172	1.0	10
0.511	205	172	1.0	10
0.455	205	172	1.0	10
0.404	205	172	1.0	10
0.361	205	172	1.0	10
0.320	205	172	1.0	5
0.287	205	172	1.0	5
0.254	205	172	1.0	5
0.226	205	172	1.0	5
0.203	205	172	1.0	5
0.180	205	172	1.0	5
0.160	205	172	1.0	5
0.142	205	172	1.0	5
0.127	205	172	1.0	5

注 表中未列的直径，其抗拉强度采用与其接近的上一个规格的数值；伸长率采用与其接近的下一个规格的数值。

表 3.6-31 铜包铝线的直流电阻率和标称密度

类 别	最大电阻率 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	电导率 (%IACS)	密 度	
			标称密度 (g/cm^3)	偏差值(%)
10A、10H	0.027 43	62.85	3.32	±3
15A、15H	0.026 76	64.42	3.63	

表 3.6-32 铜包铝线高频集肤深度特性

铜包铝线直径 (mm)	最薄铜层厚度(mm)		集肤深度(mm)		
	10A、10H	15A、15H	5MHz	10MHz	100MHz
2.15	0.038	0.054	0.029 96	0.021 19	0.006 70
2.77	0.048	0.069			
3.15	0.055	0.079			

表 3.6-33　铜包铝线的铜层厚度和铜层体积比

类　别	厚度最薄点	铜层体积比
10A、10H	不小于线半径的 3.5%	不小于 8%，且不大于 12%
15A、15H	不小于线半径的 5.0%	不小于 13%，且不大于 17%

表 3.6-34　铜包铝线、铜线和铝线的物理、力学性能

项　目			电工用铝	电工用铜	含铜 10% 铜包铝	含铜 15% 铜包铝
铜截面(%)			0	100	10	15
铜重量(%)			0	100	26.8	36.8
物理性能	密度(20℃)(g/cm³)		2.70	8.89	3.32	3.63
	熔点(℃)		660	1083	—①	—①
	比热容(20℃)[×4.185J/(g·℃)]		0.215	0.092	0.182	0.149
	熔解热(×4.185J/g)		95	51	83	79
	线膨胀系数(20℃)		2.4×10^{-6}	1.7×10^{-6}	2.3×10^{-6}	2.2×10^{-6}
	热传导系数(20℃)[×4.185J/(cm·s)]		0.53	0.94	0.57	0.59
	电阻率(20℃)(Ω·cm²)		2.740	1.724	2.612	2.442
	电阻温度系数(0～100℃)		0.004 0	0.003 9	0.004 0	0.004 0
	电导率(%)	软	62	100	66	70
		硬	61	98	64	68
力学性能	抗拉强度(MPa)	软	7～11	22～27	9～11	9～12
		硬	15～21	35～47	17～23	18～24
	屈服强度($\sigma_{0.2}$%)(MPa)	软	2～3	6～8	2～4	2～4
		硬	12～17	30～43	15～20	16～21
	伸长率(%)	软	23～25	30～45	25～30	25～30
		硬	0.5～2.0	0.5～2.0	0.5～2.0	0.5～2.0
	硬度(VHN)	软	25	60	—	—
		硬	45	120	—	—
	剪切强度(MPa)	软	5	10	6	6
		硬	10	20	10	10
	弹性模数(MPa)		6300	12 000	6900	7200
	刚度(MPa)		2700	4200	2800	2900
其他	软化开始温度(℃)		100	130	—	—
	软化温度(℃)		350	350	—	—
	热扩散系数(cm²/s)		0.915	1.15	0.945	1.09
	体积比热容(20℃)[×4.185J/(cm³·℃)]		0.580	0.818	0.604	0.540

① 化合物($CuAl_2$)。

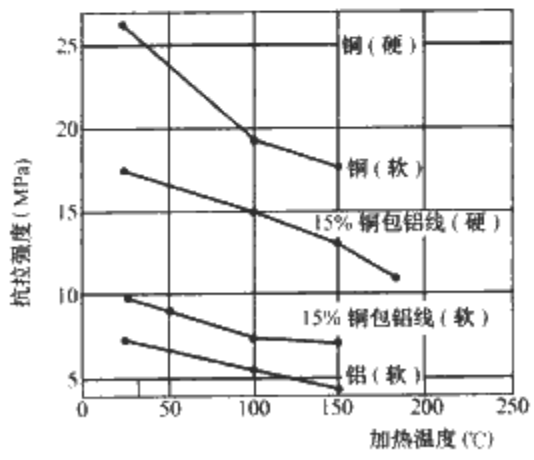


图 3.6-31　铜包铝线、铜线和铝线的高温性能

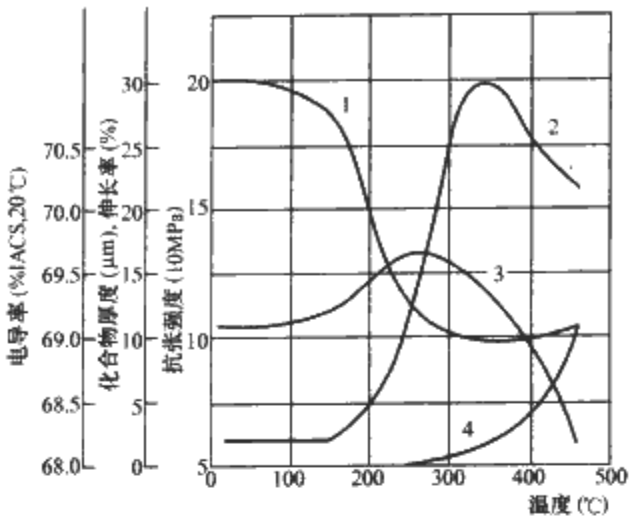


图 3.6-32　15%铜包铝线(ϕ2.0)加热后机械性能、电导率、化合物厚度的变化(硬线 N_2 气氛加热 1h)

1—抗张强度；2—伸长率；3—电导率；4—化合物厚度

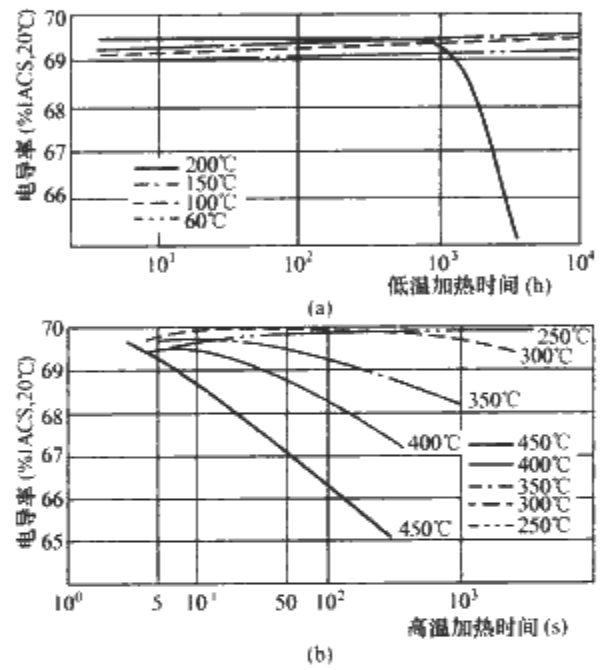


图 3.6-33　低温及高温下加热时间对电导率的影响(φ2mm 线放在盐浴中加热)

铜包铝线的耐蚀性能如图 3.6-34 所示。图中腐蚀增减量由下式计算：

$$\text{腐蚀增减量} = \frac{W_0 - W_t}{2S}\quad (\text{mg}\cdot\text{cm}^2)$$

式中：W_0 为原来重量，mg；W_t 为 t 月后的重量，mg；S 为铜包铝线端面面积，cm^2。

铜包铝线经腐蚀试验后其力学性能和电导率均无变化(表 3.6-35)。

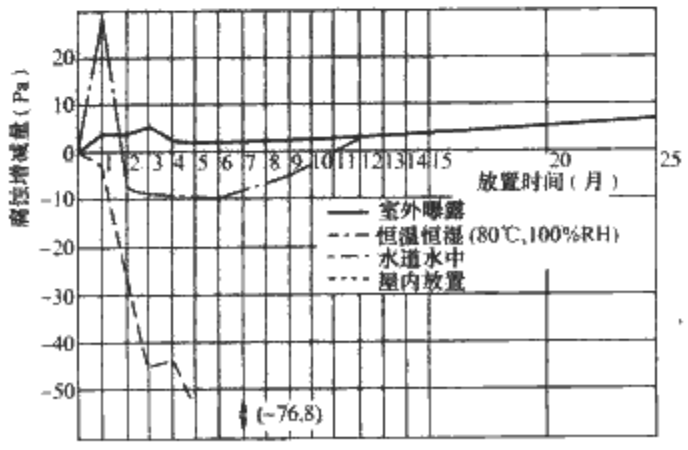


图 3.6-34　铜包铝线的长期腐蚀试验

表 3.6-35 铜包铝线腐蚀试验结果

试验项目	暴露时间		
	试验前	70 天	130 天
抗拉强度（MPa）	21.1	20.8	20.8
伸长率（%）	2.6	2.2	2.0
弯曲次数（次）	13	12	11
电导率（%IACS）	66.5	66.3	66.2

注 试验条件：SO_2 浓度 1%，湿度为 99%。

铜包铝线的连接性能如图 3.6-35 所示，当接触力较小时，铝—铝、铜—铝的接触电阻较高，随着接触力的增加，接触电阻下降。从图中可以看出：铜-铜、铜包铝-铜包铝连接时，即使在接触力较小的情况下，其接触电阻都小，且两者极接近。

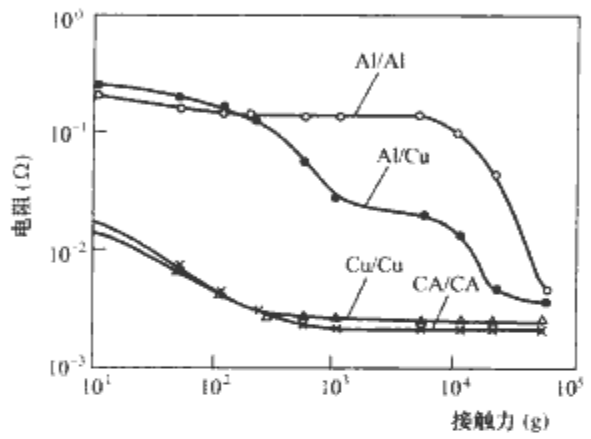


图 3.6-35 接触力与接触电阻关系
（CA 为铜包铝）

1.2.4 铜包铝线的应用

在铜资源紧缺和铜价持续上涨的今天，推广应用铜包铝线（和铜包钢线）不仅有技术经济的意义，而且还有战略的意义。铜包铝线（排）可应用于：汇流排，在电气开关等场合；漆包线（和镀银铜包铝特种漆包线，线径达 0.05～0.07mm），在喇叭线、电脑元件线等场合；电子线，在电阻器、电容器等元件引线场合；内导体的中心线和外导体的屏蔽线、移动通讯基站管形镀层线，在射频同轴电缆等；线缆芯线，在电力电缆、电焊机电缆、布电线等场合；汽车布线，在汽车电池线、电力连接线、汽车后窗除雾器动力线，捆扎线束等场合应用。

（1）铜包铝线在汽车布线中的应用。用铜包铝线制造的线缆或同时用铜包铝线和铜包钢线制造的汽车捆扎束线可减轻重量、缩小体积，并改善其柔软性和安装性能，从而对汽车性能和油耗带来良好的作用，对方便安装和降低组件的成本也有好处。

硬拉铜包铝线在汽车用电线和捆扎线束中代替铜线应用，其降低重量、节省铜资源，如表 3.6-36、表 3.6-37 所示。线规 AGW10 铜包铝导线与线规小一号的 AWG12 铜导线在电气性能上相当，但重量明显减轻，约可减轻 40%（见表 3.6-37）。这一规律也适用于各种规格的电线。

表 3.6-36 10%硬拉铜包铝线的性能

线种	铜的厚度	铜的体积（%）	电阻率（Ω·mm²/m）	密度（g/cm³）	抗拉强度（MPa）
铜包铝线	直径的 2.5%	10	0.027	3.3	250
铜线	100%	100	0.017	8.9	230

表 3.6-37 铜包铝线与铜线的比较

线规和线种	结构（股数/线径）（mm）	电阻（Ω/km）	导体重量（kg/km）	电流容量（A）
AWG10 铜包铝线	19/0.57	5.6	16	47
AWG12 铜线	19/0.46	5.9	27	46

10%铜包铝线的电阻比实芯铜线的电阻小两个线规，例如 12AWG（2.05mm），10% 铜包铝线，与同样长度 14AWG（1.63mm）铜线，有同样的电阻。在汽车后窗除雾器动力线中以 16AWG 铜包铝线代替 18AWG 铜线的优点如表 3.6-38 所示。

表 3.6-38 汽车后窗除雾动力线用铜包铝线的结果

线规和线种	重量（kg）	电阻（mΩ）	导体成本
18AWG 铜线	0.003 8	7.72	较高
16AWG 铜包铝线	0.002 8	7.72	较低
改进	26%	—	−10%

在汽车电池线中，以铜包铝线代替铜线，其优点如表 3.6-39 所示。此种概念车要求电池线 6 米，绝缘材料用 TFE。根据所需电流用 4AWG（6.5mm 导体）铜线或 2AWG（7.5mm 导体）铜包铝线。如表 3.6-39 显示这两种线的比较。用铜包铝线的电线比用铜线的电线重量少 0.4kg。由于汽车要求使用一对电线，所以用铜包铝线后重量减少 0.8kg，这将有利于降低成本。

表 3.6-39 概念车电池线的性能

线 种	直 径（mm）	电 阻（mΩ）	导体重量（kg）	电线重量（kg）
4AWG 铜	9.27	5.2	1.18	1.72
2AWG 铜包铝	10.80	5.0	0.68	1.31

（2）铜包铝线在射频同轴电缆中的应用。在电视系统用的物理发泡射频同轴电缆是新一代的射频同轴电缆。这种电缆其内导体采用铜包铝线或铜包钢线，其外导体采用铝塑复合带加铝合金线编织或铝管结构，可以节约用铜，降低成本，提高电缆的可靠性。

内导体为铜包铝线的物理发泡电缆，主要用于干线、分支线的传输线。相同重量同规格的铜包铝线长度是圆铜线的 2.7 倍。采用铜包铝线作为内导体的电缆，安装简易，柔软性好，使用安全可靠。在铝管外导体电缆中，铜包铝线和铝管有大致相同的热膨胀系数和弹性模数，两种结构材料以大致相同的速率共同膨胀或收缩，这就大大减少了因温度变化或外力作用而出现各种故障的可能。

铜包铝线和铜包钢线的铜层厚度应满足高频下电流透入深度的要求。根据通信电缆的传输原理，在高频下由于集肤效应作用的结果，电流实际上是沿着内导体表面极薄的一层流动，而导体的中心或内层是不起作用的。频率愈高，电流愈趋于导体表面，其电流密度也越大。电流透入导体内部的程度可用透入深度 Q 来表示，透入深度与所用材料及频率 f（Hz）有关。铜材的电流透入深度可用下式计算：

$$Q_{铜} = \frac{67}{\sqrt{f}} \quad (mm)$$

假设频率为 10MHz，采用铜包铝线或铜包钢线，根据

上式计算得出的电流透入深度为 0.021mm。外径为 2.15mm、铜体积为 8% 的铜包铝线，其铜层厚度大于 0.045mm；外径为 1.0mm、铜体积为 30% 的铜包钢线，其铜层厚度大于 0.08mm。这两种双金属线的铜层厚度，均已大大超过电流透入深度的理论值。当频率愈为增加，电流透入深度值就愈小。因而铜包铝线和铜包钢线能够保证高频下信号传输的畅通，具有铜内导体一样的导电性能。

采用铜包铝线的射频同轴电缆，其衰减常数也同样可符合射频同轴电缆标准的要求。衰减常数反映了电磁波能量沿电缆传输时的损耗和大小，是射频同轴电缆的主要传输特性之一。传输损耗包括绝缘材料引起的介质损耗和导体材料引起的电阻损耗，其中以内导体的损耗最大。因此铜包铝线的质量对衰减常数的影响相对较大。现以用铜包铝线制成的 SYWY—75—12 型射频同轴电缆为例，其衰减常数与纯铜线相比是一致的，都能满足射频同轴电缆标准的要求（见表 3.6-40）。

表 3.6-40　不同内导体的 SYWY—75—12 型射频同轴电缆衰减常数的对比

标准要求及内导体线种	最大衰减常数（1×10^{-2}dB/m）			
	50MHz	200MHz	550MHz	800MHz
标准要求	1.90	3.90	6.70	8.20
铜包铝线	1.72～1.68	3.53～3.42	6.00～5.93	7.35～7.24
铜线	1.76	3.54	6.03	7.30

1.3　铜包钢线

1.3.1　铜包钢线及其特点

铜包钢线是在一根圆钢线外均匀、连续、紧密地包复着一层铜的双金属线，它有铜和钢的特点，即具有铜的优秀的导电性和耐腐蚀性，又有钢的高强度性能。

（1）机械强度高。在相同截面和硬态下，铜包钢线的机械强度是实心铜线的两倍，能承受较大的负荷，在环境条件比较苛刻、移动比较频繁的场所使用时具有较高的可靠性和抗疲劳强度，使用寿命比较长。

（2）可起到以钢节铜的效果。降低成本，节约铜资源。

（3）在适度的范围内，可调节铜包钢线的电导率和强度。一般在钢上包复的铜层占其体积的 20%～35% 左右，电导率为 30%～40%IACS，薄铜层的铜包钢线其电导率可达 20%IACS。根据对导线强度的需要可采用不同的钢号，以达提高强度的目的。为了特殊的需要可在铜包钢线上镀锡（锡合金）、镍、银和金使用。甚至不作导体用途，为了获得高强度和耐腐蚀性能，可制成不锈钢包钢线。

（4）在一定的高频区域，铜包钢线的导电性能优于相同外径的实心铜导线，也即前者的阻抗比后者更小。这种高导电特性与传输频率及导线的结构有关。初看起来这种高导电特性似乎难于理解，因为钢的传输性能比铜差，两者的复合体的传输性能好像不可能比铜线更好，这是因为往往忽略了磁导率的因素，尽管钢的电导率比铜小，但前者的磁导率却比后者大得多。正因为如此，电磁波在钢—铜界面上的反射效应不容忽略，而这种反射效应使得导线内的磁场分布有别于实心铜导线，所以由电磁场分布决定的导电性能优于实心铜导线是可能的。故而，不能简单地用导线的材料和截面来判断它的导电性能。

1）铜包钢线的高导电现象。为了讨论铜包钢线与铜线导电性能的相对关系，为此定义铜包钢线和铜线的一次参数的比值为铜包钢线的相对值，即铜包钢线的相对阻抗 Z_r、相对电阻 Z_r 及相对电感 L_r 为：$Z_r \equiv Z_{cs}/Z_{cu}$、$R_r \equiv R_{cs}/R_{cu}$、$L_r \equiv L_{cs}/L_{cu}$。在直流电或频率较低的电路中，铜包钢线的导电性能不可能优于相同外径的铜线。在频率相当高时，由于电磁场的趋肤效应，两种导线的导电性能应该趋于相同，于是一般认为，随着传输频率的逐渐增加，铜包钢线的相对阻值只能从大于 1 到等于 1，而不会出现小于 1 的情况。但当频率增加到一定的区域，会出现相对阻值小于 1 的这种情况（见表 3.6-41 及图 3.6-36）。

表 3.6-41　铜包钢线和铜线的电阻及电感值比较

f(MHz)	R_{cu}(Ω/km)	R_r	L_{cu}(μH/km)	L_r
2	123.124 0	1.210 5	9.329 1	0.573 7
4	171.714 9	0.974 3	6.602 8	0.771 4
6	209.018 2	0.923 8	5.392 7	0.889 1
8	240.472 4	0.925 7	4.670 9	0.957 0
10	268.187 1	0.942 5	4.178 2	0.993 3
12	293.244 7	0.960 6	3.814 4	1.010 3
14	316.288 1	0.975 7	3.531 6	1.016 6
16	337.737 9	0.986 7	3.303 6	1.017 2
18	357.884 0	0.9942	3.114 7	1.015 2
20	376.940 0	0.9989	2.954 9	1.012 3

注　铜包钢线和铜线外径 d 相同为 1.0mm；铜包钢线的铜层厚度 t=0.04mm。

在高频下，由于导线内部的电感（内感）相对于导线外部的电感（例如外部绝缘层的电感）来说很小，因而将主要讨论导线的电阻值。由表 3.6-41 和图 3.6-36 可以看出：

①当传输频率超过某一界限（记作：f_b，在图 3.6-36 中约为 3.58MHz），铜包钢线的相对电阻小于 1，即有 $R_r < 1$，（$f > f_m$）。这个频率界限 f_b 与导线的铜层厚度 t 及外径 d 有关，t 越大则 f_b 越小。

②当频率增加到某一定值（记作：f_m，在图 3.6-36 中约为 6.77MHz），铜包钢线的相对阻值具有极小值，即 $R_r = R_{rmin}$，（$f = f_m$）。这个极值所对应的频率 f_m 也与 t 和 d 有关。

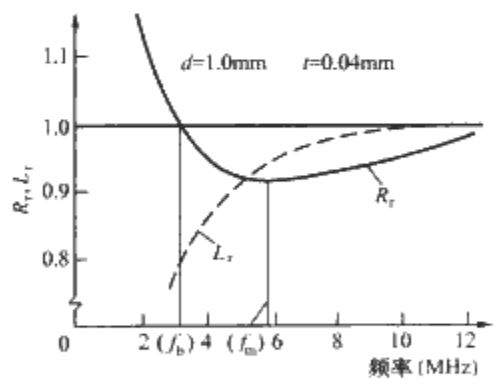


图 3.6-36　铜包钢线与铜线的电阻比值和电感比值与频率的关系曲线

③当频率继续增加时，铜包钢线的相对阻值逐渐趋于 1。这表明，当 $f > f_b$ 时，铜包钢线的导电性能就开始优于铜线。

2）铜包钢线的高导电特性与频率、铜层厚度及外径的关系。

在图 3.6-37 中给出了铜包钢线相对阻值的极小值与传输频率、铜层厚度及导线外径的大致关系。

（5）铜包钢线在射频对称电缆（图 3.5-38）中的邻近效应。在射频对称电缆（如用于计算机网络的射频对称电缆）的导体中不仅有集肤效应和复合界面处的反射效应，而且也存在邻近效应。用铜包钢线代替铜线将比原电缆的传输性能

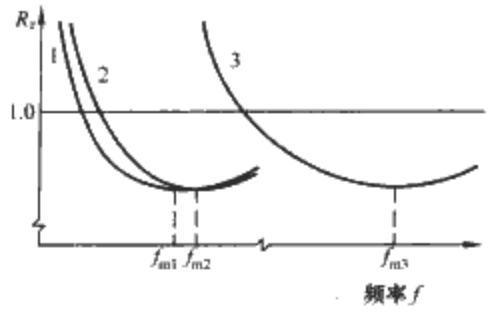


图 3.6-37 铜包钢线的相对电阻与频率及导线结构的关系示意图

曲线 1：d=5.0mm，t=0.040mm，f_{m1}=6.75MHz

曲线 2：d=1.0mm，t=0.040mm，f_{m2}=6.77MHz

曲线 3：d=1.0mm，t=0.020mm，f_{m3}=27.3MHz

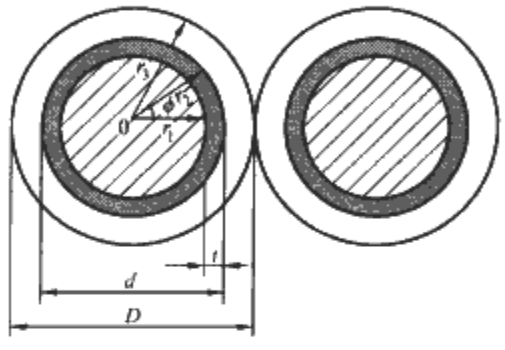


图 3.6-38 铜包钢线对称电缆的截面示意图

r_1、r_2 和 r_3 分别是铜包钢线的钢芯、铜包钢线和绝缘的半径，$t=r_2-r_1$，为铜层厚度，$d=2r_2$ 为铜包钢线的直径，$D=2r_3$ 为绝缘外径，也是对称线对的导线中心间距

更优越。

一般而言，邻近效应和集肤效应一样，会降低导线的导电性能，或者说，降低导线的导电效率。然而，据研究表明，与铜线对称电缆相比，铜包钢线对称电缆的邻近效应明显小些，因而导电性能会更好。

当两根导线相距很远时，反映电感与邻近效应没有关系（严格地说是关系极其微弱），故主要考虑电缆的高频电阻与邻近效应的关系。图 3.6-39 中示出了铜包钢线对称电缆、铜线对称电缆、铜包钢线和铜线的高频电阻的比较。图中不仅显示在该频率区域，铜包钢线对称电缆和铜包钢线的高频电阻均小于铜线对称电缆和铜线的高频电阻，还表明两种对称电缆的高频电阻差值要比对应的（裸）线电阻差值更大。

铜包钢线对称电缆与铜线对称电缆的电阻比 R_r，将其定义为铜包钢线对称电缆的相对电阻，进一步研究表明：当 $0.75<\sqrt{ft}<0.18$ 时，则 $R_r<1$。这结果表明，当铜层厚度和应用频率满足上式时，不仅铜包钢线的高频电阻小于同规格的铜线，而且铜包钢线对称电缆的高频电阻也小于同规格的铜线对称电缆。当 $\sqrt{ft}>0.18$ 时，则 $R_r\approx1$，即两种对称电缆的高频电阻趋于一致。所以，只要应用频率满足 $0.075<\sqrt{ft}<0.18$，则用铜包钢线对称电缆取代铜线对称电缆是完全可行的。例如，铜包钢线的铜层厚度 t=0.02mm，则在 f

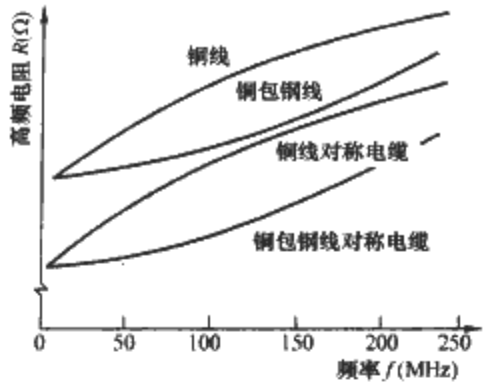


图 3.6-39 铜包钢线对称电缆、铜线对称电缆、铜包钢线和铜线高频电阻的比较

铜包钢线对称电缆：t=0.01mm，d=1.0mm，D=1.5mm

铜线对称电缆：d=1.0mm，D=1.5mm

铜包钢线：t=0.01mm，d=1.0mm

铜线：d=1.0mm

<14MHz 时，铜包钢线对称电缆的传输性能不低于铜线对称电缆。

（6）铜包钢线与镀铜钢线是有区别的，往往给选用者造成混淆，两者的差别除表 3.6-1 所示的主要区别外，由于制造方法的不同（见下述），镀铜钢线只能获得较薄的铜层厚度，且电镀设备庞大、耗电量也大、对环境有污染，这是它的不足之处，但它的生产历史较长，其间在工艺和设备上也有所改进完善。总之，选用铜包钢线还是镀铜钢线应由用户根据性能、质量的要求和价格合理选用。

1.3.2 铜包钢线的制造

从历史发展看制造铜包钢线和镀铜钢线的方法有许多，但曾经投入生产的方法归纳起来大致有四类，即制造镀铜钢线的电镀法、制造铜包钢杆的轧制法、连续纵包焊接法和热涂法。

（1）制造镀铜钢线的电镀法。电镀法有：连续螺旋电镀法（也称肯模阿法，该法于 20 世纪 60 年代初上海电缆研究所曾进行了研究试制）、多段直线式连续电镀和往复穿线式（即滚镀法）连续电镀。电镀的工艺由有毒（氰化物）电镀发展为无毒电镀，但质量还是有毒电镀的好，基于环保问题，目前一般都用无毒镀铜工艺。

（2）制造铜包钢线的轧制法。铸造双金属锭—热轧—拉线法。该法生产效率低、废料多、产品长度短、偏心度高，已被历史所淘汰。

另一种双根铜带轧制包复—拉线法。由美国铜包钢公司（Copperweld）开发，其工艺流程如图 3.6-40 所示。根据生产需要，拉到所需尺寸的钢杆（芯）先经过两向校直机矫直后进入旋转式钢丝刷清理器，刷去钢杆上的铁锈、油污和其他残余物。残留的铁锈在后面的“马弗”室中尚可进一步除去。为了控制钢芯的张力，在钢丝刷清理器的入口处有一个控制钢杆张力的松紧器。这个松紧器与矫直机相关，以调节主动的矫直机和压合机之间的传动关系。刷过的钢芯进入高频感应加热器加热，在加热器的线圈的管子中充有氩气，以

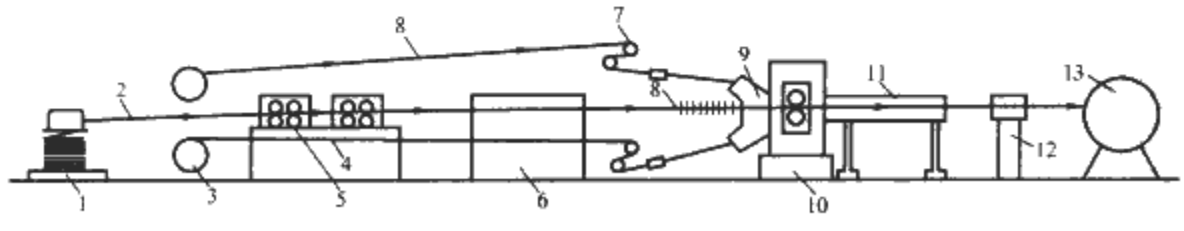


图 3.6-40 双根铜带包复法工艺流程

1—放钢杆；2—钢杆；3—放铜带；4—铜带；5—钢杆校直；6—钢丝刷清理；7—接触轮；8—高频感应加热；9—气氛控制室；10—压合机；11—铜包钢杆冷却区；12—修飞翅；13—绕杆

避免氧化。

铜带放出后进入有两个接触轮的接触加热器敞开加热。加热后的铜带表面有一层氧化膜，接着进入充有氮气的“马弗”室。

在压合机入口处的“马弗”室里充有氨气，它不仅防止铜带和钢杆产生氧化，而且可除去铜带上的氧化膜和钢杆上的残留铁锈。“马弗”室的出口如同普通轧机的进口导板盒。这个“导板盒”使两根铜带与中间的钢杆上下对正进口孔型。压合机为一个两辊式轧机，两个轧辊通水内冷，并且是两根铜带加热电路的接触点。

压合后的铜包钢杆有一对飞边（耳子）。由于这种铜包钢杆温度很高，为了防止淬火效应，先使它自然冷却，再进入氨气管除去表面的氧化铜使之光亮。随后修去飞边，但要留一点飞边，以防露钢和提高此处的致密度（图 3.6-41）。最后绕杆，并送下工序拉线。

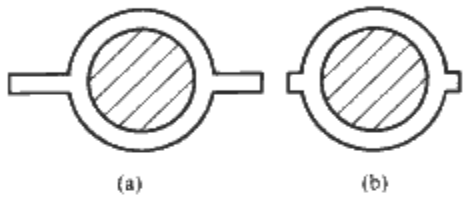


图 3.6-41　压合后的铜包钢杆

(a) 修飞边前；(b) 修飞边后

铜带与钢芯结合的一个重要条件是温度的控制，结合好的铜包钢线在弯曲试验后断口处的铜与钢不分开。从理论上讲，热压时的正压力要大于宽度方向的反压力，但这并不等于说在横向铜带的结合处与钢芯间便形成“气隙”。因为在加热后铜带是很软的，完全可以充满孔型。同时，为了避免形成“气隙”在孔型设计时把辊缝设计得非常小，圆角半径 r 也小（见图 3.6-42），并且要使耳子“B”充满。

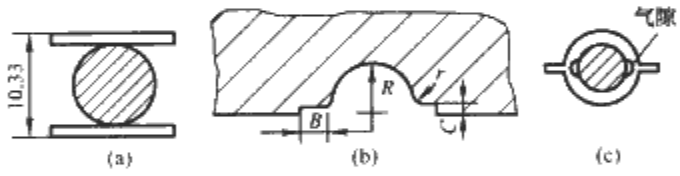


图 3.6-42　压合及孔型

(a) 铜带与钢芯进孔型前；(b) 压合孔型；

(c) 压合后的铜包钢杆

在一般情况下，铜带加钢芯的总厚度为一常数约为 10.33mm。根据含铜量（与要求的电导率有关）的不同，钢芯直径也相应变化。例如，当钢芯直径为 8.71mm，铜带的厚度则为 0.81mm，而生产出的铜包钢杆直径为 9.65mm。

这种工艺的合格率为 95%，而铜的净耗（如耳子等）为 0.5%～1%。

拉铜包钢线既不同于拉铜线又不同于拉钢线。模子的材料与线的规格有关。

ϕ1.63mm 以上的线，采用碳化钨模。

ϕ0.81～1.63mm 的线，采用聚晶钻石模。

ϕ0.81mm 以下的线，采用天然钻石模。

由于钢和铜的性质不同，为了防止因压缩过大，致使剪变形过大而造成铜层拉裂，故模角（θ）要比铜拉线模小，采用 10°～12°，定径区长度 a 为线径的 35%～40%（图 3.6-43）。拉线用润滑剂有肥皂粉、乳浊液和油脂。用肥皂粉时速度宜慢，用乳浊液拉线速度要快些。拉线机和铜拉线机相似，采用 7 模大拉机和 11～13 模小拉机。铜包钢圆线一般不需退火处理，如果要拉小线或小扁线，需在保护性气氛中退火。退火温度原则上按钢的退火温度考虑。

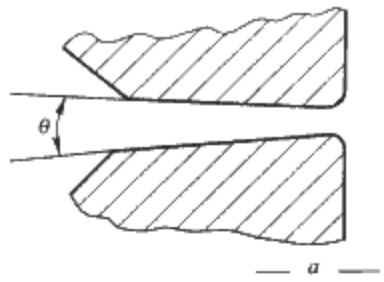


图 3.6-43　铜包钢拉线模（碳化钨）

θ=10°～12°；a=35%～40%d

钢芯的温度采用非接触式光纤维红外测温仪测量，测定的温度用数字直接显示出来，同时通过电子控制系统控制加热电流，达到自动调温的目的。铜带的温度也用红外测温仪测定，两根铜带只测量其中一根的温度，亦采用电子控制系统。温度的控制与进入压合机的速度是相匹配的。当温度偏低时，则压合的速度将自动变慢。

轧辊材料采用钨钼钢，表面经热处理后 $R_c \approx 55$。轧辊采用水内冷，每个轧辊开四条轧槽，每条轧槽的寿命为 200h，相当可轧的重量为 90.7t，每个轧辊总计可轧的重量为 363～454t。

（3）制造铜包钢杆的连续纵包焊接法。用连续纵包焊接法制造铜包钢杆的装备与制造铜包铝杆的装备相似，往往可以一机多用，其生产线的组成如图 3.6-44 所示。该方法产量高、制品同心度好，可适应多规格和多品种（如铜包钢、铜包铝、不锈钢包钢和镍包铜等）生产。从焊接质量和用户的特需考虑，最好采用无氧铜带作为包复材料。从铜与钢的结合状况和有利于铜包钢杆的大拉考虑，采用压力模拉线是有利的。有关铜包钢杆的拉线，已在前面作了类同的介绍，在此不再赘述。

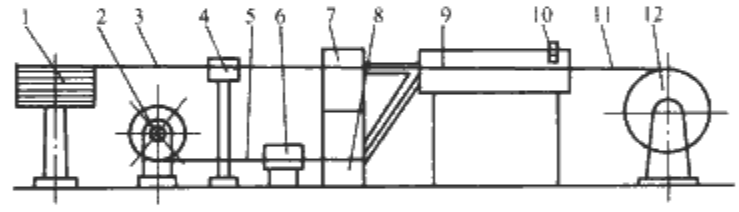


图 3.6-44　连续纵包焊接法制造铜包钢杆生产线组成示意图

1—放钢杆；2—放铜带；3—钢杆；4—矫直；5　铜带；6—铜带去油；7—钢杆刷洗；8—铜带刷洗；9—纵包；10—氩弧焊；11—铜包钢杆；12—收杆

（4）制造铜包钢杆的涂制法。

1）制造铜包钢杆的热浸涂法工艺流程如图 3.6-45 所示。用热浸涂法制造铜杆是由美国通用电气公司开发的，国内亦有引进。在此基础上，经转化改进用以制造铜包钢杆。芯杆通过导轮进入坩埚，芯线在坩埚内覆盖了凝固的金属铜后，热的坯杆将进入坩埚上方的冷却塔，从冷却塔内出来后进入连轧机组，由热轧机组轧制成铜包钢杆。为了确保进入坩埚的芯有光洁的表面，芯杆首先要通过扒皮模扒去一层外皮，但经过扒皮模的芯杆为防止表面氧化或沾上污物、灰尘等，要求芯杆扒皮后进入惰性气体室。这个惰性气体地带一直延续到坩埚的底部，使芯线没有污染机会。铜的冷凝被覆率取决于铜液与钢杆的热交换。通过控制钢杆预热温度、铜液温度和浸涂时间，达到要求的铜层厚度。

浸涂法生产的铜包钢线其铜层为无氧铜，铜与钢之间形成冶金结合，可以牢固地结合成一体；铜的包复率控制范围大（20%～85%），可大规模生产。设备投资大，成本高。此方法生产的铜包钢线已被用于接触线（电车线）、电极引

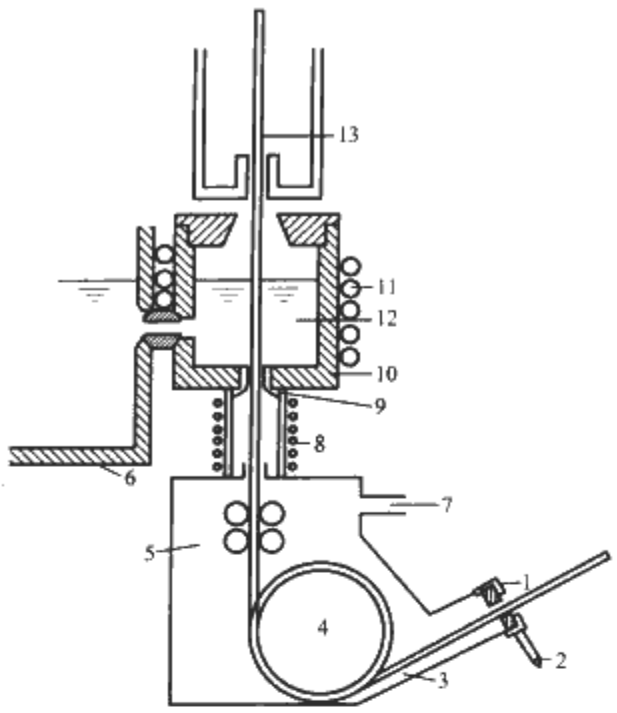


图 3.6-45 热浸涂法工艺流程示意图

1—剥皮模；2—冷却装置；3—钢杆；4—牵引轮；5—夹送轮；6—保温炉；7—惰性气体入口；8、11—感应加热器；9—插入嘴；10—坩埚；12—铜液；13—涂铜钢杆

线、接地棒等。此方法由于铜层厚度受钢杆温度、铜液温度、液面高度等影响，工艺比较复杂。涂铜钢杆经热轧后拉线获得要求的铜包钢线。

2）制造铜包钢杆的引涂法。此法是在制造无氧铜杆的上引法机组的基础上经转化改造而成，为国内自行开发，目前只能生产质量要求不太高的产品。

由引涂法生产的铜包钢杆（其铜层为无氧铜），经拉线后获得要求的铜包钢线。

3）制造铜包钢杆的水平连铸法。铜包钢杆的水平连铸工艺是传统的热浸涂和连续铸造的结合。它主要分为表面处理、钢芯预热、铸造和后处理等四个部分，其工艺流程如图 3.6-46 所示。表面处理是为了获得结合性能好的铜、钢界面，在连铸包复前必须对钢芯表面进行彻底清理。因此，钢芯首先要通过拉拔剥去表面的氧化皮，然后进行矫直，再经除油、酸洗、水洗等工序使钢芯表面清洁。钢芯预热是为了形成良好的润湿环境，减少钢芯吸热，保持金属液温稳定。连续铸造是工艺的核心，它把表面清洁的钢芯和铜液通过结晶器的冷却而结合在一起，达到铜、钢包复的目的。后处理主要是对铜包钢杆进行拉线和热处理，获得要求的铜包钢线。连铸包复是技术的关键所在，它决定了产品的生产率和质量。

由于钢芯的引入，使水平连铸铜包钢杆的生产工艺过程不易稳定，这是问题之一，其关键是要实现钢芯温度、连铸温度、牵引速度及冷却强度等工艺参数的协调匹配，解决钢芯吸热而引起铜液凝固与结晶器内铜液凝固之间的关系等，乃是该工艺的难点所在。此外，如何保证铜包钢杆的同心度，这是问题之二。

1.3.3 铜包钢线的标准及疲劳性能

我国目前还未制订电工用硬拉铜包钢线、CATV 引入线用铜包钢线和电子用铜包钢线的行业标准或国家标准，用户往往引用美国标准 ASTM B227—2004（电工用硬拉铜包钢线标准）、ASTM B452—2002（电子用铜包钢线标准）、ASTM B869—2004（CATV 引入线用铜包钢线标准）或按我国有关制造厂的企标进行订货。

（1）ASTM B227—2004 标准对电工用硬拉铜包钢线规定的级别和性能要求。

电工用硬拉铜包钢线分为四个级别，即

40HS 级—高强度，电导率 40%IACS。

40EHS 级—超高强度，电导率 40%IACS。

30HS 级—高强度，电导率 30%IACS。

30EHS 级—超高强度，电导率 30%IACS。

硬拉铜包钢线的强度要求如表 3.6-42 所示。

表 3.6-42 硬拉铜包钢线的强度要求

标称线径 (mm)	抗拉强度，最小值（MPa）			
	40HS 级	40EHS 级	30HS 级	30EHS 级
5.19	745.2	—	828.0	983.2
4.62	779.7	—	862.5	1038.4
4.19	814.2	—	897.0	1086.7
4.11	814.2	—	897.0	1086.7
3.67	848.7	—	913.5	1131.6
3.26	883.2	—	966.0	1173.0
3.25	883.2	—	966.0	1173.0
2.91	917.7	—	1000.5	1200.6
2.64	956.3	1076.4	1041.9	1207.5
2.59	956.3	—	1041.9	1235.1
2.05	793.5	—	828.0	1235.1
2.03	793.5	—	828.0	1235.1
1.63	862.5	—	897.0	1235.1
1.02	897.0	—	913.5	1235.1
0.99	897.0	—	913.5	1235.1
0.81	913.5	1110.9	1000.5	1235.1

硬拉铜包钢线的线径偏差如表 3.6-43 所示。

表 3.6-43 硬拉铜包钢线的线径偏差

线 径 (mm)	线径允许公差 (mm)	线 径 (mm)	线径允许公差 (mm)
5.189～2.540(包括)	±1.5%	2.029～1.524(包括)	+0.025 −0.038
2.537～2.032(包括)	±0.038	1.521 及以下	±0.025

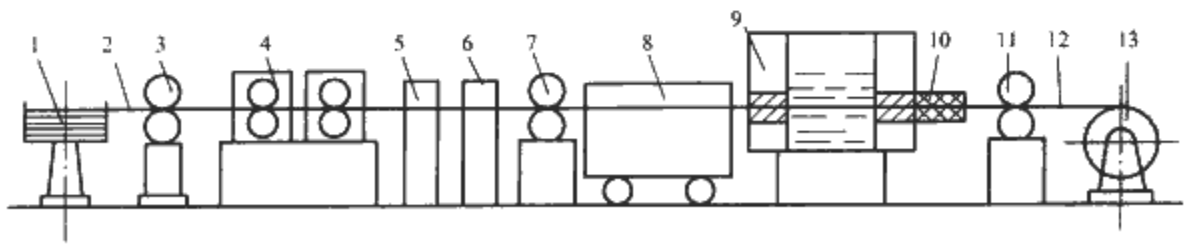


图 3.6-46 铜包钢杆水平连铸法工艺过程

1—放钢芯；2—钢芯；3 剥皮；4—矫直；5—酸洗槽；6—水洗槽；7—夹送轮；8—干燥炉；9—感应电炉和铜液；10—结晶器；11—牵引装置；12—铜包钢杆；13—收杆

硬拉铜包钢线的伸长率（试样标距长 250mm）应不小于 1%（不用引伸仪测量）或 1.5%（用引伸仪测量）。

硬拉铜包钢线的扭转性能，在试样长度等于 100 倍线径时，在扭转速度约 15r/min 下，应经受不少于 20 次扭转而不破坏。接着将试样扭到破坏应不出现接缝、凹坑、裂缝或表面缺陷或线内的缺陷。在试样破坏时检验线样应不呈现铜、钢分离的现象。

硬拉铜包钢线的最大电阻如表 3.6-44 所示。硬拉铜包钢线的最小铜层厚度和密度见表 3.6-45。

表 3.6-44　　硬拉铜包钢线的最大电阻

标称线径（mm）	最大电阻（Ω/km）	
	40HS 和 40EHS	30HS 和 30EHS
5.19	2.143	2.856
4.62	2.703	3.595
4.19	3.284	4.380
4.11	3.408	4.544
3.67	3.408	5.725
3.26	5.416	7.221
3.25	5.459	7.277
2.91	6.834	9.111
2.64	8.271	11.024
2.59	8.612	11.483
2.05	13.799	18.396
2.03	14.082	18.773
1.63	22.215	29.617
1.02	56.203	74.905
0.99	60.107	80.122
0.81	90.293	120.379

表 3.6-45　　硬拉铜包钢线的铜层厚度和密度

级别	最小铜层厚度（线半径的百分数）	在 20℃下的密度（g/cm³）
30	不小于 6	8.15
40	不小于 10	8.24

（2）常州市武进恒通金属钢丝厂企业标准（Q/320412 HTR 003—2003）对电工用铜包钢线规定的级别和性能要求。

电工用铜包钢线分为 TBG20、TBG25、TBG30 和 TBG40 四个级别。铜包钢线的抗拉强度、电导率、标称密度和直径偏差分别见表 3.6-46、表 3.6-47 和表 3.6-48。铜包钢线的伸长率、扭转性能及它们的试验方法与上述的 ASTM B227—2004 标准的要求相同。为便于计算，铜包钢线的铜和钢的标准截面比和有关的物理常数示出在表 3.6-49 中。

表 3.6-46　　铜包钢线的抗拉强度

标称直径 d（mm）	最小抗拉强度（MPa）					
	TBG20	TBG25	TBG30A	TBG30B	TBG40A	TBG40B
$4.62<d\leqslant5.20$	1050	985		830	1076	745
$4.20<d\leqslant4.62$	1100	1040		865		780
$3.67<d\leqslant4.20$	1150	1090		900		815
$3.26<d\leqslant3.67$	1200	1135		935		850
$2.90<d\leqslant3.26$	1250	1175		970		885
$2.65<d\leqslant2.90$	1300	1200		1000		920
$0.8<d\leqslant2.65$	1300	1235		1042		956

注　TBG30 和 TBG40 级的铜包钢线，按其强度分为 A 和 B 两种型式。

表 3.6-47　　铜包钢线的电导率、标称密度和铜层厚度

级　别	20℃时的最小电导率（%IACS）	20℃时的标称密度（g/cm³）	铜层厚度（标称直径的百分数）	
			平均铜层厚度	最小铜层厚度
TBG20	20	8.00	3.5	3.0
TBG25	25	8.10	5.0	4.0
TBG30	30	8.15	6.5	6.0
TBG40	40	8.24	10.0	9.0

表 3.6-48　　铜包钢线的直径偏差

标称直径（mm）	偏　差（mm）
$2.70\leqslant d<5.50$	±0.04
$2.05\leqslant d<2.70$	±0.03
2.05 以下	±0.025

表 3.6-49　　铜包钢线有关的物理常数和铜、钢的标准截面比

参数 \ 级别		TBG20	TBG25	TBG30	TBT40
最终弹性模数（GPa）		180	177	174	165
线膨胀系数（℃⁻¹）		12.1×10^{-6}	12.3×10^{-6}	12.5×10^{-6}	13.1×10^{-6}
电阻温度系数（℃⁻¹）		0.003 8			
铜和钢的标准截面比	铜比	15%	20%	25%	38%
	钢比	85%	80%	75%	62%

（3）ASTM B452—2002 对电子用铜包钢线规定的级别和性能要求。

电子用铜包钢线分为四个级别，即：

30HS 级—标称电导率为 30%IACS 的硬拉铜包钢线。

30A 级—标称电导率为 30%IACS 的退火铜包钢线。

40HS 级—标称电导率为 40%IACS 的硬拉铜包钢线。

40A 级—标称电导率为 40%IACS 的退火铜包钢线。

电子用铜包钢线的抗拉强度和伸长率见表 3.6-50。

表 3.6-50　　电子用铜包钢线的抗拉强度和伸长率

线径（mm）	截面积（mm²）	抗拉强度（MPa），最小值			伸长率（%），最小值（标距 250mm）		
		30HS	30A	40HS	40A	30HS 和 40HS	30A 和 40A
1.83	2.63	875.1	345.0	757.5	310.0	1.5	15
1.63	2.08	875.1	345.0	757.5	310.0	1.5	15
1.45	1.65	875.1	345.0	757.5	310.0	1.5	15
1.29	1.31	875.1	345.0	757.5	310.0	1.5	15
1.15	1.04	875.1	345.0	757.5	310.0	1.5	15
1.02	0.823	875.1	345.0	757.5	310.0	1.0	15
0.912	0.653	875.1	345.0	757.5	310.0	1.0	15
0.813	0.519	875.1	345.0	757.5	310.0	1.0	15

续表

线径 (mm)	截面积 (mm^2)	抗拉强度 (MPa)，最小值			伸长率 (%)，最小值 (标距 250mm)		
		30HS	30A	40HS	40A	30HS 和 40HS	30A 和 40A
0.724	0.412	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	15
0.643	0.324	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	15
0.574	0.259	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	15
0.511	0.205	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.455	0.162	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.404	0.128	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.361	0.102	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.320	0.080 4	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.287	0.064 7	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.254	0.050 7	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.226	0.040 1	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.203	0.032 4	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.180	0.025 5	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.160	0.020 1	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.142	0.015 9	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.127	0.012 7	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.114	0.010 3	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.102	0.008 11	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.089	0.006 21	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10
0.079	0.004 87	875.1	379.3	757.5	345.0	1.0	10

电子用铜包钢线在 20℃下的最大电阻率，30HS 和 30A 级为 0.058 62Ω · mm^2/m（29.41%IACS），40HS 和 40A 级为 0.043 97Ω · mm^2/m（39.21%IACS）。铜包钢线的线径偏差规定为：线径 0.254mm 以下，不大于±0.003mm；线径 0.254mm 及以上，不大于线径的±1%。电子用铜包钢线对铜与钢的附着力有明确的要求，附着力的优劣用扭转试验进行考核，也即在试件长度为 100 倍线径、扭转速度约为 15r/min 下，按同方向扭转不少于 20r 时，试件能经受不被破坏，然后继续将试件扭到破坏，此时试件应不呈现接缝、凹坑、裂缝或其他的内在缺陷。在破坏时对试件的检查用肉眼进行，应没有铜、钢分离的现象。对成品铜包钢线的表面光洁度检验，用肉眼进行，表面应没有露钢，并且所有的表面不完整均可认为与良好的工业实践不相一致。由于同心度的原因，因此规定了铜层的最小厚度（见表 3.6-51）。为了便于计算单位长度的重量和截面积等，在表 3.6-51 中亦列出了铜包钢线的密度。

表 3.6-51 电子用铜包钢线的铜层厚度和密度

线的电导率 (%IACS)	铜层最小厚度，不小于 (线半径的百分数)	密 度 (g/cm^3)
30	6	8.15
40	10	8.24

注 铜层最小厚度的测定用试件抛光的端部，在显微镜下进行，或者经供、需双方同意，用合适的方法进行，或者可用标准的剥去铜层的方法进行。

（4）ASTM B869-04 标准对 CATV 引入线用铜包钢线的性能要求。该标准适用于同轴电缆中心导体用的电导率为 21%的硬拉铜包钢线。此种铜包钢线的线径及其公差、最大电阻和最小铜层厚度如表 3.6-52 所示，其相应的面积、计算拉断力和单位重量列于表 3.6-53（仅供参考）中。

表 3.6-52 21%IACS 电导率硬拉铜包钢线的性能

标称线径 (mm)	线径公差 (mm)	在 20℃下每公里最大电阻 (Ω)	最小铜层厚度 (mm)
1.63	±0.015	40.29	0.024
1.45	±0.015	50.89	0.022
1.29	±0.013	64.21	0.019
1.15	±0.013	80.94	0.017
1.02	±0.010	102.05	0.015
0.81	±0.008	161.67	0.012
0.72	±0.008	204.29	0.011

表 3.6-53 21%IACS 电导率硬拉铜包钢线的计算拉断力和单位重量（仅供参考）

标称线径 (mm)	截面积 (mm^2)	计算拉断力，最小值 (×9.8N)	每公里重量 (kg)
1.63	2.08	175.3	16.5
1.45	1.65	139.1	13.5
1.29	1.30	110.1	10.4
1.15	1.04	87.4	8.3
1.02	0.82	69.3	6.7
0.81	0.52	43.5	4.1
0.72	0.41	34.0	3.3

注 计算时采用 20℃下的密度为 7.98g/cm^3。

CATV 引入线用铜包钢线的最小抗拉强度和最小伸长率分别为 827MPa 和 1%；基于最小线径测定的最大电阻，相应的电导率应不小于 21%IACS，计算用的电阻温度系数采用 0.003 8/℃；对最小铜层厚度的测定可直接测量横截面或用基于导磁计原理的电测仪表测定；铜与钢的结合力和附着力是保证铜包钢线性能的基础，为此在标准中对执行扭转试验有明确的要求，也即在试件长等于 100 倍线径，扭转速度约 0.25rad/s 的条件下，试件应经受不少于 20 转扭转而不破坏。继续将试件扭到破坏，不应呈现接缝、凹坑、裂缝或其他的内在缺陷。在破坏时检验试件应没有铜、钢的分离现象。

（5）GJB 882A—2002 国家军用标准对被复线用铜包钢线性能的要求。被复线是用于连接电话机的、可以重复收放而又便于携带的单对绝缘通信线，其典型的结构如图 3.6-47 所示。被复线的型号有 8 个，其中代号为 TGE—707，称为“铜包钢被包线”，它的导电线芯采用铜包钢线。对铜包钢线的主要技术要求如表 3.6-54 所示。

对被复线用铜包钢线要求进行内部成分分析、孔隙率检测、盐雾腐蚀试验、腐蚀电流密度和极化阻力的型式试验。采用扫瞄电镜进行内部成分分布分析（见表 3.6-55）；孔隙



图 3.6-47　军用被复线典型的结构示意图
1—导电线芯；2—绝缘层

率检测，按 GB 12333—1990 标准进行；铜加速盐雾试验按 GB 6460—1986 标准进行，试验条件如表 3.6-56 所示。腐蚀电流密度（i_{corr}），试验条件为：溶液－3%NaCl 水溶液，pH=8；温度－室温（20℃左右）；设备－IM6e Electrochemistry workstation，扫瞄速度－3mV/s。极化阻力试验条件为：溶液－3% NaCl 水溶液，pH＝8；温度－室温（20℃左右）；设备－IM6e Electrochemistry workstation；充电电流－5μA。

表 3.6-54　　铜包钢线的主要技术要求

直径（mm）	不圆度（mm）	直流电阻（Ω/km）	伸长率（%）	拉断力（N）	铜层最小厚度（μm）	孔隙数（个）
0.24±0.005	≤0.005	≤1000	≥1.0	48～55	≥25	≤5

注　1. 在生产中亦供应直径 0.20mm 的被复线用铜包钢线。
2. GBJ 882A—2002 标准中对铜包钢线有孔隙数（率）的要求，其实由包复法生产的铜包钢线，对这个顾虑是不必要的。如需做孔隙率试验，其试验方法可参见 GB 12333—1990 中 A1 的规定，试样长度为 1.0m。

表 3.6-55　　被复线用铜包钢线微区成分分析（举例）

分析取点	距离铁铜界面	分析元素（%，质量分数）	
		Fe	Cu
1	外侧，2μm	2.883	97.117
2	外侧，1μm	4.185	95.815
3	位于界面	23.431	76.569
4	内侧，1μm	84.551	15.449
5	内侧，2μm	97.286	2.714
6	内侧，4μm	99.080	0.920

表 3.6-56　　铜加速盐雾试验条件

盐雾箱型号：YW/S- 250	工作室温度：45℃	空气预热温度：45℃
NaCl 浓度：5 重量%	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$：0.26g/L	pH 值：3.1～3.3
喷雾方式：连续	总喷雾时间：48h	样品放置方式：与垂直线呈 20°
样品冲洗方式：去离子水冲洗	盐雾沉降量：2mL/(80cm² · h)	

（6）上海瓦恩德特种金属材料有限公司生产的 CATV 铜包钢线、被覆线铜包钢线、电话通信引入线铜包钢线和电子元器件铜包钢 CP 线的技术性能。

CATV 铜包钢线的物理性能见表 3.6-57，该产品适于制作 RG59、RG6、RG7、RG11 等有线电视同轴电缆，技术性能符合中国 YD/897.1—1997 标准。

表 3.6-57　　CATV 铜包钢线的物理性能

标称直径（mm）	直径偏差（mm）	截面积（mm²）	拉断力（N）	伸长率，最小值（%）	电导率（%IACS）	单位质量（kg/km）	铜层厚度（mm）
0.81	±0.008	0.159	836	≥1.0	21	41.2	0.027
					30	41.5	0.047
					40	42.3	0.073

续表

标称直径（mm）	直径偏差（mm）	截面积（mm²）	拉断力（N）	伸长率，最小值（%）	电导率（%IACS）	单位质量（kg/km）	铜层厚度（mm）
1.02	±0.008	0.823	836	≥1.0	21	65.4	0.034
					30	65.8	0.060
					40	67.0	0.093
1.29	±0.013	1.308	836	≥1.5	21	104.6	0.043
					30	105.2	0.075
					40	107.2	0.117
1.63	±0.013	2.082	836	≥1.5	21	166.9	0.141
					30	158.0	0.177
					40	171.1	0.224

被覆线铜包钢线（属硬拉铜包钢线）的物理性能见表 3.6-58，该产品适用于制作被覆线，技术性能符合中国 GJB 882A—2002 标准。

表 3.6-58　　被覆线铜包钢线的物理性能

标准直径（mm）	直径偏差（mm）	直流电阻（20℃）（Ω/km）	拉断力（N）	伸长率（%）	铜层厚度（μm）
0.24	±0.005	≤1000	48～55	≥1.0	≥25
0.20	±0.003	≤1300	35～42	≥1.0	≥18

电话通信引入线铜包钢线的物理性能见表 3.6-59，该产品适于制作聚乙烯、聚氯乙烯护套平行双芯电话通信引入线，技术性能符合中国 YD/T 722—1994 标准。

表 3.6-59　　电话通信引入线铜包钢线的物理性能

标准直径（mm）	直径偏差（mm）	拉断力（N）			电导率（%IACS）	直流电阻（20℃）（Ω/km）	弯曲性能	卷绕性能（自身直径圈）
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ				
1.0	+0.02 −0.01	920	720	350	20	87	≥6	≥8
					30	72		
					40	54		
1.2	+0.03 −0.01	1020	800	500	20	63	≥6	≥8
					30	51		
					40	38		

电子元器件铜包钢 CP 线的物理性能见表 3.6-60，该产品适于制作电阻、电容、晶体管等电子元器件的引出线，技术性能符合 SJ 2421—1983 标准，产品以软态或硬态交货。

表 3.6-60　　电子元器件铜包钢 CP 线的物理性能

标准直径（mm）	直径偏差（mm）	抗拉强度（MPa）		伸长率（%）	反复弯曲（次）		电导率（%IACS）
		Y	R	R	Y	R	
0.4	+0.02 −0.010	≥450	≤320	>10	≥4	≥5	≥30
0.5	+0.02 −0.010	≥450	≤320	>10	≥4	≥5	≥30

续表

标准直径（mm）	直径偏差（mm）	抗拉强度（MPa）		伸长率（%）	反复弯曲（次）		电导率（%IACS）
		Y	R	R	Y	R	
0.6	+0.02 0.010	≥450	≤320	>10	≥4	≥6	≥30
0.8	+0.03 −0.015	≥450	≤320	>12	≥4	≥6	≥30
1.0	+0.03 −0.015	≥450	≤320	>12	≥4	≥6	≥30
1.2	+0.04 −0.020	≥450	≤320	>12	≥4	≥6	≥30

注 R—软态；Y—硬态。

（7）泰州市中义电缆厂生产的镀铜钢线的技术性能。

镀铜钢线的电导率分为 21%IACS、34%IACS 和 40%IACS 三个级别，其性能见表 3.6-61。

（8）铜包钢线的疲劳性能。铜层为无氧铜，钢芯为低碳钢（钢的成分：0.01%C，0.01%Si，0.19%Mn，0.011%P 和 0.012%S）的铜包钢杆（直径 8.0mm），经冷拉成直径 2.6mm 的铜包钢线，其疲劳曲线（S—N 曲线）如图 3.6-48 和图 3.6-49 所示。图 3.6-48 为以表面弯曲应力表示的铜包钢线的疲劳曲线，可以看出钢线与铜面积比为 20%和 30%的铜包钢线之间是有些不同的，但如果弯曲应力以铜外层的真实应力表示，则它们的 S—N 曲线几乎可以换算成一条曲线（见图 3.6-49），这条 S—N 曲线几乎与冷拉的无氧铜线具有完全相同的疲劳性能，因而，铜包钢线的疲劳性能主要取决于包层金属的疲劳性能。

表 3.6-61　　镀铜钢线的性能

直径（mm）	公差（±mm）	单位质量（kg/km）	在 20℃下的直流电阻（Ω/m）			最小拉断力（N）						伸长率，标距 250mm，（%）	
						软态（A）			硬态（HS）			软态（A）电导率 20%～40%	硬态（HS）电导率 20%～40%
			电导率 21%	电导率 30%	电导率 40%	电导率 21%	电导率 30%	电导率 40%	电导率 21%	电导率 30%	电导率 40%		
0.102	0.01	0.07	10.2	7.17	5.38	3.24	3.16	2.88	6.13	5.31	4.49	≥10	≥1.4
0.120	0.01	0.10	7.4	5.18	3.89	4.48	4.38	3.98	8.48	7.35	6.22	≥10	≥1.4
0.130	0.01	0.12	6.31	4.42	3.31	5.26	5.14	4.67	9.95	8.63	7.30	≥10	≥1.4
0.150	0.01	0.16	4.74	3.32	2.49	7.00	6.84	6.22	13.3	11.5	9.72	≥10	≥1.4
0.160	0.01	0.18	4.16	2.92	2.19	7.96	7.78	7.08	15.1	13.1	11.1	≥10	≥1.4
0.180	0.01	0.23	3.29	2.30	1.73	10.1	9.85	8.96	19.1	16.5	14.0	≥10	≥1.4
0.200	0.01	0.28	2.67	1.87	1.40	12.4	12.2	11.1	23.6	20.4	17.3	≥10	≥1.4
0.230	0.01	0.37	2.02	1.41	1.06	16.5	16.1	14.6	31.2	27.0	22.9	≥10	≥1.4
0.250	0.01	0.44	1.71	1.19	0.90	19.4	19.0	17.3	36.8	31.9	27.0	≥10	≥1.4
0.280	0.01	0.55	1.36	0.95	0.71	24.4	23.8	21.7	46.2	40.0	33.9	≥10	≥1.4
0.300	0.01	0.63	1.18	0.83	0.62	28.0	27.4	24.9	53.0	45.9	38.9	≥15	≥1.4
0.350	0.01	0.86	0.87	0.61	0.46	38.1	37.2	33.9	72.2	62.5	52.9	≥15	≥1.4
0.400	0.01	1.13	0.67	0.47	0.35	49.8	48.6	44.2	94.2	81.7	69.1	≥15	≥1.4
0.450	0.01	1.43	0.53	0.37	0.28	63.0	61.5	56.0	119	103	87.5	≥15	≥1.4
0.500	0.02	1.78	0.43	0.30	0.22	77.8	76.0	69.1	147	128	108	≥15	≥1.4
0.550	0.02	2.13	0.35	0.25	0.19	94.1	91.9	83.6	178	154	131	≥15	≥1.4
0.600	0.02	2.53	0.30	0.21	0.16	112	109	99.5	212	184	156	≥20	≥1.4
0.643	0.02	2.91	0.26	0.18	0.14	129	126	114	244	211	179	≥20	≥1.4
0.650	0.02	2.97	0.25	0.18	0.13	131	128	117	249	216	183	≥20	≥1.4
0.700	0.02	3.45	0.22	0.15	0.11	152	149	135	289	250	212	≥20	≥1.4
0.750	0.02	3.96	0.19	0.13	0.10	175	171	156	331	287	243	≥20	≥1.4
0.800	0.02	4.51	0.17	0.12	0.09	199	195	177	377	327	276	≥20	≥1.4
0.900	0.02	5.70	0.13	0.09	0.07	252	246	224	477	414	350	≥20	≥1.4
1.000	0.02	7.04	0.11	0.07	0.06	311	304	276	589	511	432	≥20	≥1.4
1.200	0.02	10.1	0.07	0.05	0.04	448	438	398	848	735	622	≥20	≥1.4

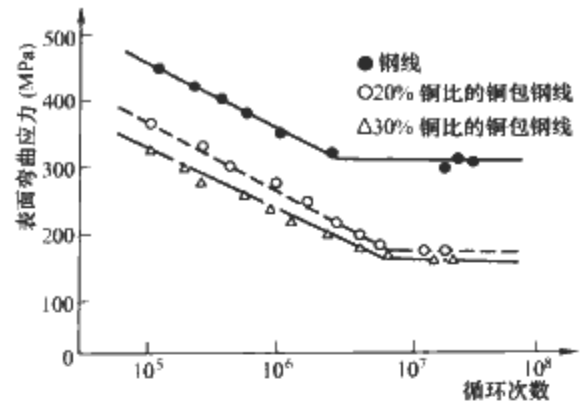


图 3.6-48　以表面弯曲应力表示的铜包钢线疲劳性能

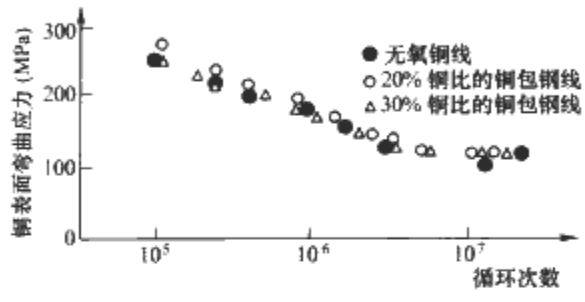


图 3.6-49　以铜表面弯曲应力表示的铜包钢线疲劳性能

1.3.4　铜包钢线的应用

铜包钢线兼有钢的强度及铜的电导率和耐腐蚀性，它用于那些比铜要求更高强度，同时可适用于降低电导率也可接受的场合。铜包钢线通常的电导率为 21%IACS、30%IACS 和 40%IACS，铜层厚度分别为单线半径的 6%、14%和 20%，钢的级别为 1006、1010、1022 号和 1055 号钢。在特殊的应用中也需要和生产电导率为 50%IACS、60%IACS、70%IACS 和 76%IACS 的铜包钢线。铜包钢线可在通信工业，电子工业，铁路系统，输、配电系统，汽车工业，石油工业中应用。

在通信工业中，以铜包钢线作为内导体，用于物理发泡同轴电缆，主要用于用户分配网络系统。在电话系统中，用于引入线和农村布线，铜包钢电话线路跨距长度可达 100～150m，在风暴小的地方，甚至可达 180m，为铜线的 2～3 倍，每公里可节约电杆 10～13 根；在铁路系统中主要用于信号和通信线、载流或不载流承力索、吊弦线；在电子工业中用于天线、引线、共用天线电视电缆、同轴电缆、无线电高频线圈、碳刷软引线等；在输、配电系统中，主要用于高强度耐腐蚀的架空导线、接地线（棒）；在石油工业中，主要用于地球物理探矿电缆；在汽车工业中，主要用于汽车布线、汽车捆扎线束、绝缘双金属绞线等。

（1）在通信工业中的应用。主要用作通信线缆的芯线，已获得广泛的应用，一般如果采用电导率为 20%IACS 的铜包钢线，可以采用电镀法获得，但对电导率为 30%IACS 和 40%IACS 的铜包钢线用电镀法就较难生产，只有极少数厂能够生产。

（2）铜包钢接地棒或镀铜接地棒在变电站接地网改造中的应用。随着 35kV 变电站内电子产品越来越多的使用，其遭雷击产生过电压的问题也日益突出。根据电力行业标准 DL/T 621—1997《交流电气装置的接地的规定》，接地装置的接地电阻应符合 R 小于或等于 $2000/I$（I 是流经接地装置的最大入地短路电流，A）。近年来上海电力公司发生了多起雷击事故，究其原因，其中一个重要的原因就是变电站的接地网问题。存在问题的原因主要在于接地电阻过大，直接导致雷击残压的升高、忽略了接地网的防腐蚀问题，地下接地体、接地线（尤其是焊接口）腐蚀严重、采用不同金属的水平接地体和垂直接地体使得在焊接口容易造成电化腐蚀，从而增大接地电阻和降低热稳定水平和接地体或接地引下线截面偏小等。随着电力系统的发展，系统容量急剧增加，大电网技术的日益广泛地推广应用，以及对接地系统的日益重视，使用铜材作为水平接地装置已被越来越多的专家所认可，而与之相配套的铜包钢（镀铜）接地棒也逐渐被专家们认可。

对铜包（镀铜）钢接地棒的使用可降低接地电阻，增加接地极的使用寿命，提高整个接地系统的可靠性，其技术要求如下：

1）接地棒的铜层厚度大于或等于 0.254mm，接地棒弯曲 30°时，弯角外缘应没有破裂，内缘应没有波折。

2）包铜（镀铜）要求：用车床将接地棒表面往内部切削，使其小于原有直径 1mm，车削到足以暴露铜层与钢芯，外包（镀）铜层应没有剥离现象。

3）接地棒抗拉强度大于或等于 586.5MPa。

4）容易打入地下，铜层不破裂，不脱落。

5）铜层与钢芯完美结合，铜层表面以 25 倍放大镜检测没有破洞。

6）产品寿命超过 30 年。

铜包(镀铜)接地棒与钢质接地棒的技术比较如表 3.6-62 所示。铜包(镀铜)接地网与钢质接地网的经济比较见表 3.6-63。现选取典型的 35kV 变电站举例，按最终 3 台 20 000kVA 容量变压器考虑，其主建筑占地面积一般在 500～600m^2 左右。接地系统主网的设计采用在距离主建筑外墙 2m 处埋设 40×4 铜排（敷设于户外地下 0.8m）环绕构成主接地网。中间间隔以每 5～10m 左右，敷设直径为 50mm×2500mm 的镀锌接地极，数量为 20 根左右。如将这 20 根镀锌接地极更换成直径为 14.2mm，长 3.6m 的铜包（镀铜）接地棒[由 3 根 1.2m 的（铜包）接地棒续接]，那么全站接地系统的可靠性和稳定性将得到极大的提高，其相应的增加费用如表 3.6-64 所示。由表 3.6-62～表 3.6-64 可以看出，尽管绝对数量有所增加，但从两者的技术经济比较看，包铜（镀铜）接地棒要优于镀锌接地极；同时全所接地的安装费用在整个 35kV 变电站的总造价（约为 1900～2000 万元左右）中，只占了相当小的 0.38%的比例，而增加的费用只有 28 320 元，只占了 0.14%的比例。用此小的成本，换取整个接地网的更高可靠性和稳定性，无疑是值得的。

表 3.6-62　　两种接地棒的技术比较

比较项目	铜包（镀铜）接地棒	钢质接地棒
等效面积（mm^2）	1	15
密度（g/cm^3）	8.9	7.86
电阻率（20℃）（Ω·m）	0.017 8	0.138
导电性	好	较差
泄流能力	好	较差
耐腐蚀性	一般	差
使用寿命	超过 30 年	一般 5～10 年
可靠性	较好	较差
稳定性	较好	较差

表 3.6-63　　两种接地网的经济比较

比较项目	铜包（镀铜）接地网	钢质接地网
一次性投资	大	小
直接经济价格（元/t）	35 000	4000
维护费	1	1.05

续表

比较项目	铜包（镀铜）接地棒	钢质接地棒
施工	容易	困难
载流量	大	小
设计截面	小	大
改造的可能性	一般不需要	需大规模开挖
经济比较值	0.66	1

表 3.6-64 两种接地极的费用比较

比较项目	铜包（镀铜）接地棒	镀锌接地极
装置材料费	65 070	50 000
全所接地安装费合计	105 011	76 691
经济比较系数	0.66	1
经济比较值	69 307	76 691

（3）铜包钢线在汽车工业中的应用。

1）铜包钢线在汽车布线中的应用——它适用于汽车中的细电线。这种线一般采用 1006 号钢的低碳钢芯和电导率为 40%IACS 铜包钢线（硬线），其主要性能如表 3.6-65 所示。美国线规 AWG26 的铜包钢线（截面积 0.13mm²）的抗拉强度与 AWG20（截面积 0.5mm²）相当，这样线的截面和重量可减小，减轻 74%左右。即使采用 AWG24（截面积 0.22mm²）的铜包钢线，线的面积也减 56%，重量减轻 62%，而电线的强度则可明显提高（见表 3.6-66）。

表 3.6-65 40%IACS 铜包钢线的性能

线种	铜层厚度（%）	铜的体积（%）	电阻率（Ω·mm²/m）	密度（g/cm³）	抗拉强度（MPa）
铜包钢	直径的 10	36	0.044	8.2	780
铜	100	100	0.017	8.9	230

表 3.6-66 铜包钢电线与铜电线的比较

电线品种	直 径（mm）	拉断力（×9.8N）	单位质量（kg/km）	载流量（A）
0.13mm² 铜包钢	1.0	13	1.6	3～5
0.22mm² 铜包钢	1.1	22	2.4	6.5
0.35mm² 铜	1.5	8.7	3.8	14
0.50mm² 铜	1.7	14	6.3	18

注 表中所列为 PVC 绝缘电线的值。

2）铜包钢线在汽车线束中的应用——在汽车线束中硬拉铜包钢线的钢芯为 1006 号钢，电导率为 40%IACS，线规为 AWG26，它与 AWG30 的铜电线有同样的电导率，与 AWG20 铜电线有相同的强度。在汽车中有很多回路电流很低（在此种条件下，选择铜包钢线尺寸时，依据是强度，而不是载流量），要求不超过 AWG20 的铜线。使用如此小的电线不现实，因为它的强度低。然而 AWG26 铜包钢线对这类回路就成为极佳的选择，因为它有 AWG20 铜线的高强度。不同线规的铜包钢线和铜线的拉断力如表 3.6-67 所示。由表 3.6-67 看出，由于铜包钢线直径小，使产品足够柔软，由于使用硬拉铜包钢线，在绞合时可有效减小绞合线的尺寸，并且可通过改变铜、钢截面比来改变铜包钢线的强度和其他的特性。如果所用钢芯的钢号增加，则可进一步增加铜包钢线的强度。

在表 3.6-68 中示出了绝缘线的比较。如果使用铜包钢线的电线，则尺寸减小，重量减轻和成本降低。现在进一步比较用 AWG26 铜包钢线代 AWG20 铜线在线束电缆中应用的潜在优势。以线束包含 92 根线的线束电缆为例（见表 3.6-69、表 3.6-70）。事实上它所在的回路最大电流为 50mA 或更少。因此换用 AWG26 钢包钢线是一种很保守的方案，因为 AWG26，电导率为 40%IACS 的铜包钢线的载流量比 50mA 大得多。由表 3.6-70 可以看出在 18 个载流量小于 50mA 的回路中用 AWG26 铜包钢线替换 AWG20 铜线，它将比最大线束截面减少 8%，计算重量减少 15%，可以预期由于这种替换成本也可降低。

表 3.6-67 不同线规、线种、状态和钢号的铜包钢线和铜线的拉断力

美国线规 AWG	线径（mm）	线种	状态	钢芯的钢号	电导率（%IACS）	拉断力（N）
20	0.811 8	铜线	退火	—	100	13.9
22	0.643 9	铜线	退火	—	100	8.7
24	0.510 6	铜线	退火	—	100	5.6
26	0.404 9	铜包钢线	退火	1006 号钢	40	4.6
26	0.404 9	铜包钢线	硬拉	1006 号钢	40	12.4
26	0.404 9	铜包钢线	退火	1002 号钢	40	5.5
26	0.404 9	铜包钢线	硬拉	1002 号钢	40	13.5

表 3.6-68 绝缘线的比较

线 种	直 径（mm）	电 阻（Ω/m）	单位质量（kg/m）	成 本
AWG26 铜包钢线	1.295	0.31	0.002 9	最低
AWG20 铜线	1.778	0.03	0.007	最高
AWG22 铜线	1.575	0.049	0.006	中等

注 绝缘厚度 0.406mm。

表 3.6-69 铜线的线束电缆

线规和线种	直径（mm）	线数（根）	总长度（m）	总质量（kg）	面积（mm²）
AWG20 铜线	1.78	42	37.4	0.286	104
AWG18 铜线	1.98	48	33.3	0.340	148
AWG16 铜线	2.26	1	1.8	0.027	4
AWG14 铜线	2.62	1	1.1	0.023	5
全部线		92	73.6	0.68	262

表 3.6-70 在低电流回路中用铜包钢线替换的影响

线规和线种	直径（mm）	线数（根）	总长度（m）	总质量（kg）	面积（mm²）
AWG26 铜包钢线	1.30	18	12.24	0.036	24
AWG20 铜线	1.78	24	25.17	0.191	60
AWG18 铜线	1.98	48	33.3	0.340	148
AWG16 铜线	2.26	1	1.75	0.027	4
AWG14 铜线	2.62	1	1.14	0.023	5
全部线		92	73.6	0.581	241
百分比（%）				85%	92%

3）铜包钢线在汽车捆扎线束中的应用——在采用 12V 电压的汽车捆扎线束中，原来采用 AWG20 铜线的小规格电线，从电气性能角度出发，有 40%～60%可以用 AWG26 铜包钢线的电线来代替，从而可使线束的截面积减小 10%，重量减轻 14%；如果改用 42V 电压，电线中电流减小，那么就有更多原来用细铜线的电线可以用铜包钢线的电线来代替，由此，线束的截面积可望减小 20%，重量则可望减轻 28%。例如，美国有一种微型车的车身捆扎线束，由于在适当的地方改用了 AWG26 铜包钢线的电线，因此，使线束重量从 15kg 减轻为 12.7kg（减轻 15%），截面积减小 20%，

而且线束的柔软性也有了改善。

4）铜包钢线和铜包铝线同时在汽车线束中的应用——将两种概念结合在一种线束上，即将小直径的铜包钢线用于低电流回路，又将铜包铝线用作动力线，在表 3.6-71 中示出了在大型车辆上同时使用铜包钢线和铜包铝线作概念线束时，有关尺寸和重量的计算结果。表中第一部分为基本线束中线规格的分布，第二部分为铜包钢线在低电流回路所能达到的重量和尺寸。第三部分为增加一部分替换，用铜包铝线代替动力线，以制造最小重量的线束，且不增加线束的尺寸。另外还有一种替换方案，以 AWG20 铜包铝线代替 AWG22 铜线，这将能得到最小的重量，但是线束尺寸增加。

表 3.6-71　铜包钢和铜包铝线同时使用作概念车线束的计算结果

线规和线种	线　数		
	基本线束	减少尺寸	减少重量
AWG26 铜包钢线	—	216	216
AWG22 铜线	360	144	144
AWG20 铜线	150	150	—
AWG18 铜线	72	72	—
AWG16 铜线	18	18	—
AWG18 铜包铝线	—	—	150
AWG16 铜包铝线	—	—	72
AWG14 铜包铝线	—	—	18
全部线	600	600	600
截面的（%）	100	90	97
重量的（%）	100	86	77

注　1. 铜包钢线电导率 40%IACS。

2. 铜包铝线铜的体积比 10%。

说明　1. 线的规格如上分布。

2. 60%的 AWG22 线要求电导率≤AWG30 铜线的。

3. 绝缘按福特 ESB-MIL 120A。

例如，在大型铲车车门捆扎线束中，该种线束共有 22 根连接线，其中 12 根为电源线，采用铜包铝线，10 根为小电流连接线，采用铜包钢线，在包括端子、连接器和附件的情况下，重量仅 1.4kg，除质量轻以外，柔软性也明显提高。

总之，用铜包钢线和铜包铝线有可能降低汽车用线缆的质量、尺寸和刚性。质量的减轻对汽车的性能和油耗带来良好的作用。较细和更柔软的线缆对方便安装和降低成本也有利。在有望不明显增加线缆成本的基础上对汽车用线缆带来重大的改进。

1.4　其他双金属包复制品

1.4.1　耐高温腐蚀的双金属包复制品

美国“Anomet”制品公司开发的高温耐腐蚀的包复线（杆）和带是一种具有冶金结合的双金属制品，有高的耐腐蚀性能和耐热性能，比相应的实心的铂、铌、钛和金制品的价格要低，其功等同于实心的制品，但价格仅为其 1/10。

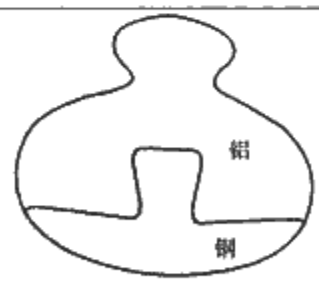
包复层的厚度为 2%及以上，其耐热性可达 1250℃，取决于包复制品所用的材料。

线制品的直径从 0.05mm 到 10mm，带宽达 25mm，芯材有铁一镍、铜、钽、钛、铌、不锈钢和镍等，包复层材料有金、银、铂、钯及其他。

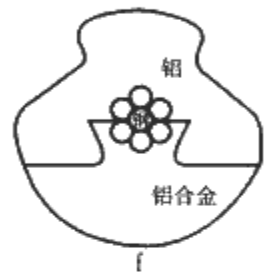
1.4.2　钢铝接触线（电车线）

我国是一个缺铜的国家，过去在车速较低和以铝节铜方针的指导下，我国钢铝复合接触线获得了很大的发展，并大量地使用。在 20 世纪 90 年代前我国约有 70%的电气化铁路使用了钢铝复合接触线（包括矿山电气化运输），其中外露式和内包式的钢铝接触的总产量约 2 万 t～3 万 t。因此，可以说我国是钢铝接触线用量最多、使用时间最长，至今还在使用的国家（特别是天气比较干燥的我国北方地区），也是生产、改革和产品结构型式最多的国家，它已为我国的建设作出了历史性的贡献。表 3.6-72 列出了双沟型钢铝接触线品种和结构（a～f）。

表 3.6-72　双沟型钢铝接触线品种和结构

名称	型号	材质	截面等级（mm^2）	结　构
钢铝复合接触线（内包梯型钢）	CGLN	钢一铝	250（120）—62/188；195（85）—55/140	 a （1）内包梯型钢，钢铝复合接触线
钢铝复合接触线（外露异型钢）	CGLW	钢一铝	215（100）—67/148	 b
	CGLW	钢一铝	173（80）—54/119	 c （2）外露异型钢，钢铝复合接触线

续表

名 称	型号	材质	截面积等级（mm^2）	结 构
钢铝及铝合金复合接触线（内包钢单线）	CGLHD	钢单线—铝—铝合金	159（85）—4.9/87.8/101.7	 d
	CGLHD	钢单线—铝—铝合金	260（150）—10.0/134.0/116.0	 e （3）内包钢单线，钢铝、铝合金复合接触线
钢铝及铝合金复合接触线（内包钢绞线）	CGLHJ	钢绞线—铝—铝合金	260（150）—9.3/134.0/116	 f （4）内包钢绞线，钢铝、铝合金复合接触线

注 1. 钢铝复合接触线截面等级含义的示例：250(120)—62/180 表示钢铝总截面积为 250mm^2，相当于铜截面积 120mm^2，其中钢截面积为 62mm^2，铝截面积为 180mm^2。

2. 钢铝及铝合金复合接触线截面等级含义的示例：195(85)—4.9/87.8/101.7 表示钢、铝和铝合金总截面积为 195mm^2，相当于铜截面积 85mm^2，其中钢截面积为 4.9mm^2，铝截面积为 87.8mm^2，铝合金截面积为 101.7mm^2。

钢铝接触线的主要优点在于拉断力大、抗事故能力强，其缺点是耐腐蚀比铜和铜合金差，而且钢与铝易产生脱开，特别是钢外露式的钢铝接触线。为了改进缺点，扩大应用，在下列方面进行了改进和开发。

（1）钢的材质。由原来用的低碳钢逐步改为低碳含铜钢（10Cu）和低碳磷铜稀土钢（10PCURE），在 20 世纪 90 年代以后开始使用高耐候结构钢（09CrPV）。

（2）接触线的结构。由钢外露式 CGLW 型（2）改为内包式 CGLN 型（1），这样既解决了钢铝脱开问题，又提高了耐腐蚀性能，而且也解决了钢外露式接触线在仓库储存期间和架空线通车以前，由于钢的腐蚀，在通车后会使受电弓与接触线间产生打火花—烧蚀—不平—打火花的恶性循环。

（3）接触线的制造长度。原来，在每公里的长度内有许多接头，改进后，可在 3800m 内连续大长度无接头。

根据 GB 12971—1991《电力牵引用接触线》标准，虽然接触线的型号和结构繁多，但过去主要生产和使用的是钢铝复合接触线和纯铜接触线两类，尤其是钢铝接触线使用最多，其中在 1990 年以后主要使用的是 CGLN 型内包梯形钢，钢、铝复合接触线，目前这种线正在包(头)—兰(州)、太原—焦(作)和朔(州)—黄(骅)线等电气化铁路上正常运行。

有关钢、铝复合接触线和钢、铝及铝合金复合接触线的主要性能如表 3.6-73 所示。

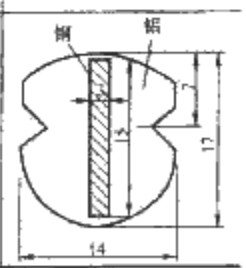
日本在 20 世纪亦曾开发了 TA 型钢铝接触线，其性能如表 3.6-74 所示。

钢、铝复合接触线有两种制造方法：①冷压合法，即将热轧型钢坯通过拉制，达到要求的钢型坯尺寸；通过冷轧和拉制或直接用连续挤铝机获得要求尺寸的铝型坯，然后钢型坯和铝型坯通过冷压，将钢、铝复合在一起，并达到要求的接触线的尺寸。冷压合的关键所在是要保证钢、铝间的结合力。②“康仿（Conform）”连续挤压法，将准备好的钢型坯通过“康仿”连续挤压机一次达到要求的钢、铝接触线的尺寸。

表 3.6-73 钢、铝复合接触线和钢、铝及铝合金复合接触线的性能

型 号	综合拉断（N）不小于	结合力（N）不小于	直流电阻不大于（Ω/km）	180°反复扭转（正反各 1 转）
CGLN250	54 000	4900	0.149	—
CGLN195	39 220	3900	0.198	—
CGLW215	49 030	3450	0.184	不开裂
CGLW173	34 320	1960	0.230	不开裂
CGLHD195	29 400	1960	0.20	—
CGLHD260	39 200	2960	0.12	—
CGLHJ260	49 000	4900	0.12	—

表 3.6-74 TA 型钢铝接触线的性能和结构

型号	截面积(mm^2)			线密度（kg/m）	综合拉断力（kN）	电阻（Ω/km）	结 构
	铝	钢	总和				
TA	152	44	196	0.76	55.4	0.189	

1.4.3 铜包钢接触线

日本藤仓株式会社于 20 世纪 80 年代后期曾开发了铜包

钢接触线。

（1）铜包钢接触线的特点。强度高，适于高速运行；耐磨性能好，因而使用寿命长和耐电弧引起的温度。该种接触线有两种电导率，GT—CS 的电导率为 60%IACS，而 GT—CSD 为 80%IACS。

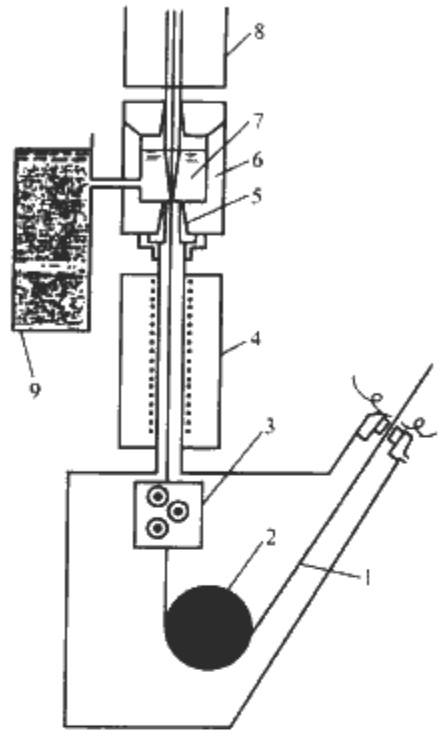


图 3.6-50　铜包钢接触线用杆的制造方法

1—钢芯杆；2—主传动；3—校直；4—预热；5—导入嘴；6—坩埚；7—熔融铜；8—冷却室；9—保温炉

（2）铜包钢接触线的制造。该方法是铜浸涂成形法的应用和改进，与制造铜包钢线用杆的热浸涂法相似（见图 3.6-45）。图 3.6-50 中示出了该方法的概貌。钢芯通过一个盛有熔融铜的坩埚，使熔融的铜凝固在钢芯上，然后将浸涂成形的铜包钢杆进行连续热轧和冷却后绕杆。铜的体积比可通过改变浸涂的时间和钢芯杆预热的温度加以广泛的控制。最后将铜包钢杆拉到铜包钢电车线的所需尺寸。

1.4.4　铜包钢接触线的性能和企业标准

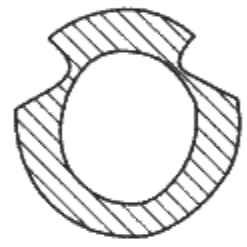
（1）铜包钢接触线的性能。铜包钢接触线（GT—CS 和 GT—CSD）的主要性能见表 3.6-75。

（2）GT—CS 型接触线典型的性能见表 3.6-76。

（3）GT—CSD 型接触线典型的性能见表 3.6-77。

（4）铜包钢接触线的耐磨性能。在实验室试验，受电弓通过次数和接触线残留直径之间的关系，如图 3.6-51 所示。

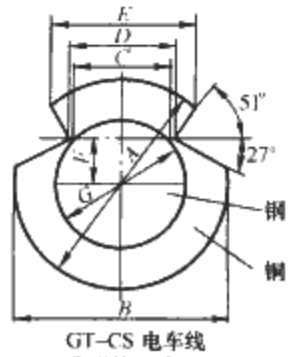
表 3.6-75　GT—CS、GT—CSD 型接触线的性能

接触线型号 性能	铜包钢接触线		铜接触线	铜包钢接触线结构
	GT—CS	GT—CSD		
电导率（%IACS）	60	80	97.5	
抗拉强度（MPa）	67	50	40	
300℃抗拉强度（MPa）①	62	38	23	
500℃抗拉强度（MPa）①	50	32	22	

① 抗拉强度是在加热 1h 后的室温下测定的。

表 3.6-76　GT—CS 型接触线典型的性能

项　目		性　能	
		GT—CS 110mm²	GT—M—CS 170mm²
截面	铜的截面积（mm²）	60.8	94.8
	铜的截面比率（%）	54.7	55.7
	钢的截面积（mm²）	50.3	75.4
	钢的截面比率（%）	45.3	44.3
	总截面积（mm²）	111.1	170.2
标称质量（kg/m）		0.935	1.435
拉断力（×9.8N）		6640	9500
破断时的伸长率（%）		3.0	3.4
抗拉强度	铜层	31.5	29.0
	钢芯	94.0	89.5
	复合的线	59.8	55.8
维氏硬度	铜层	120	120
	钢芯	290	290
在 20℃下的电阻（Ω/km）		0.259	0.169
电导率（%IACS）		60.0	60.0
钢芯的近似直径（mm）		8.0	9.8



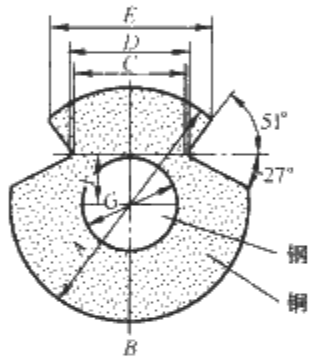
GT-CS 电车线典型的尺寸

型号和标称规格	计算截面积（mm²）	尺寸（mm）						
		A	B	C	D	E	F	G
GT—CS110	111.1	12.34	12.34	6.85	7.27	9.75	1.7	8.0
GT—M—CS170	170.2	15.3	15.3	6.85	7.27	9.75	3.9	9.7

注：上列规格和尺寸除钢芯部分外，以 JISE 2101 为基础。按专用的合同，符合其他标准要求的其他规格亦可应用

表 3.6-77 GT—CSD 型接触线典型的性能

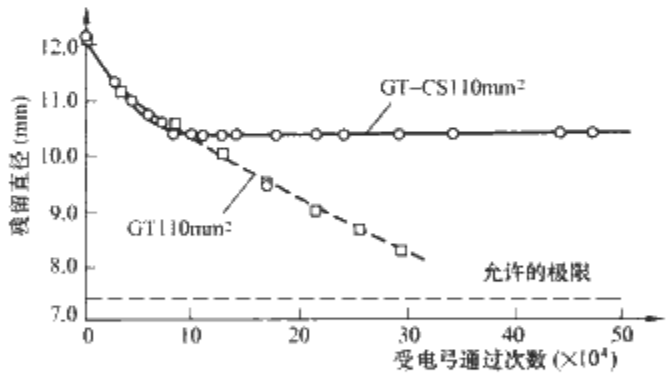
项目		性能		
		GT—CSD110mm²	GT—M—CSD170mm²	GT—CSD170mm²
截面	铜的截面积（mm²）	86.5	132.8	132.6
	铜的截面比率（%）	77.9	78.0	78.0
	钢的截面积（mm²）	24.6	37.4	37.4
	钢的截面比率（%）	22.1	22.0	22.0
	总截面积（mm²）	111.1	170.2	170.0
标称质量（kg/m）		0.962	1.475	1.473
拉断力（×9.8N）		5000	6900	6900
破断时的伸长率（%）		3.0	3.4	3.4
抗拉强度	铜层	31.1	28.0	28.0
	钢芯	94.0	85.0	85.0
	复合的线	45.0	40.5	40.6
维氏硬度	铜层	120	120	120
	钢芯	290	280	280
在 20℃下的电阻（Ω/km）		0.194	0.127	0.127
电导率（%IACS）		80	80.0	80.0
钢芯的近似直径（mm）		5.6	6.9	6.9



GT-CSD 电车线典型的尺寸

型号和标称规格	计算截面积（mm²）	尺寸（mm）						
		A	B	C	D	E	F	G
GT—CSD110	111.1	12.34	12.34	6.85	7.27	9.75	1.7	5.6
GT—M—CSD170	170.2	15.3	15.3	6.85	7.27	9.75	3.9	6.9
GT—CSD170	170.0	15.49	15.49	7.32	7.74	11.43	2.4	6.9

注：上列规格和尺寸除钢芯部分外，以 JISE 2101 为基础。按专用的合同，符合其他标准要求的其他规格亦可应用



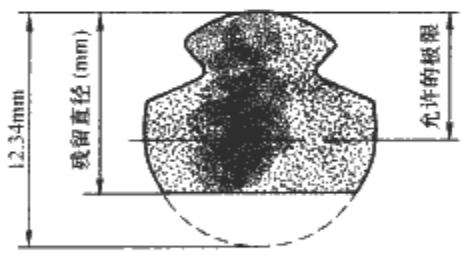


图 3.6-51 GT-CS 110mm² 接触线耐磨性能和残留直径的尺寸

试验条件：速度 30km/h，受电弓压力 55N，电流 200A

（5）铜包钢接触线的耐热性能。接触线加热温度 100～600℃（在氮气气氛中），加热时间 1h，冷却到室温后进行拉力试验，其结果如图 3.6-52 所示。即使在高温气氛下暴露后 CS 接触线仍保持较高的抗拉强度，它的耐热性明显优于铜接触线。

（6）冶金结合性能。对 GT—M—CS170 和 TG—CSD110 铜包钢接触线的试样（试样长 10mm）上施加 3t 压力，未见铜与钢的分离现象；对 CT—CS110 和 GT—CSD110 接触线进行拉力试验，在断口上未见铜与钢的分离现象；对 GT—M—CS170 和 GT—CSD110 接触线进行弯曲试验（试件制备：线的一半被削去），弯曲半径约 10mm，结果未见铜与钢的分离现象。

（7）耐腐蚀性能。GT—CS110 和 GT—M—CS170 接触线暴露在工业区的气氛中进行试验，预先削去一半的试件经过 1000 天试验后，在钢芯上观察到的最大腐蚀量为 0.18mm，在铜和钢的边界上没有腐蚀加速的现象。经 1000 天试验的试件，再经弯曲试验亦未见铜与钢的分离现象。

1.4.5 镀锡铜接触线

镀锡铜接触线不属双金属包复制品，在此仅作简单介绍。此种接触线亦用于轨道交通，重庆单轨跨座式轨道交通使用 150mm² 的梯形截面铜接触线（见图 3.6-53），如果铜接触线直接与供电的铝汇流排接触，将产生铜铝接触的电化腐蚀问题，为此铜接触线与铝汇流排的接触表面采用低温电镀锡，锡层厚度不小于 5μm。

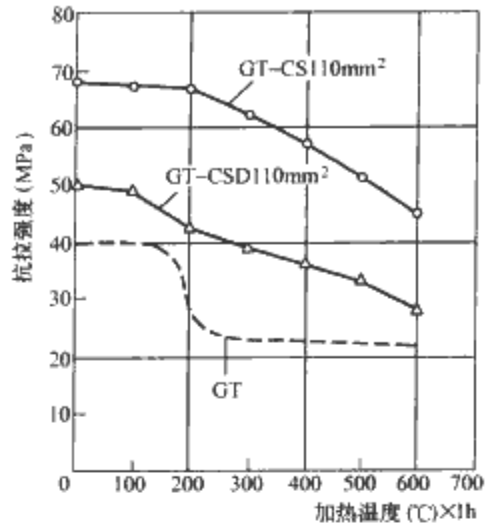


图 3.6-52　GT—CS 110mm²、GT—CSD 110mm² 和 GT 电车线的耐热性能比较

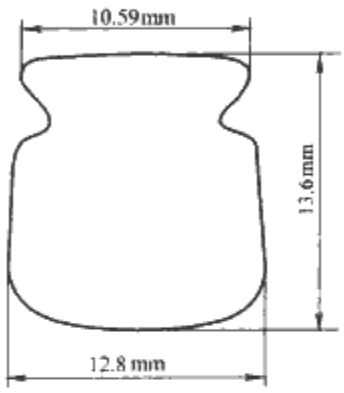


图 3.6-53　重庆单轨跨座式轨道交通用 150mm² 梯形镀锡铜接触线

2　镀层导体

所谓镀层导体是在导线上镀以一种及以上金属镀层的导线，如镀银、镀镍和锡或锡合金的铜线或铜包钢线。根据这种导体的用途，其结构有单线和绞（束）线。根据这种导体的镀层在使用中所起的作用可分为两种，一种为保护性镀层，如高温绝缘金属导电线芯用的镀层线［镀银或镍或锡（锡合金）铜线］；在铜芯橡皮绝缘线中为防止“发粘发黑”用的镀锡铜线；在射频同轴电缆中为防止铜、铝接触引起电化腐蚀的镀锡铜线。另一种为可焊性镀层，如镀锡或锡合金的铜线和铜包钢线等。

2.1　高温绝缘金属导电线芯用镀层线

2.1.1　金属镀层材料

由于铜的可焊性、低接触电阻以及耐高温等性能仍然不足，为此通常在铜单线上镀以银、镍、锡（锡合金）或银—镍、锡—镍的复合镀层。可是每种金属镀层只能改善一种或几种性能，性能提高的程度也不尽相同，因此对线芯的使用场合必须认真选择。

随着航空、航天、电子工业的发展，对导电线芯的性能和可靠性提出了更严格的要求。高温绝缘电线中的细绞（束）线（芯）一般都需经过电镀、绞（束）合并包上高温绝缘，以期达到所要求的性能。

由 7 股及以上绞（束）合的线芯的性能与基础导体材料、镀层材料和绞（束）合型式密切相关。

有关基础导体材料的特性如表 3.6-78 所示。

表 3.6-78　基础导体材料的特性

特性	镉铜（CDA162）	铬铜（CDA182）	锆铜（CDA150）	镉铬铜（PD135）	铜的一般特性	铜包钢
电导率	很好；热处理状态平均为 90%IACS	好；热处理状态平均为 85%IACS	很好；热处理状态平均为 90%IACS	很好；热处理状态平均为 90%IACS	优秀；作为 IACS% 电导率标准	差；30% 或 40% IACS，用于同轴电缆
外径控制	良好；比铜差	良好；比铜差	良好；比铜差	良好；比铜差	很好；拉线时，模具寿命长	良好
重量控制	良好	良好	良好	良好	很好；比较的标准	良好
抗拉强度	伸长率 10%～20%时，420MPa	伸长率 10%～20%时，410MPa	伸长率 10%～20%时，350MPa	伸长率 10%～20%时，480MPa	伸长率 10%～12%时，260MPa	伸长率 10%～12%时，390MPa
弯曲性能	比铜大 10 倍	比铜大 7 倍	比铜大 3 倍	比铜大 20 倍	作为比较的标准	比铜大 3 倍
可压接性	非常好，但需要较大的压力	非常好，但需要较大的压力	非常好，但需要较大的压力	非常好，但需要较大的压力	优秀	优秀，与铜相当
可焊接性	很好，要用比铜强的熔剂	很好，要用比铜强的熔剂	很好，要用比铜强的熔剂	很好，要用比铜强的熔剂	优秀，使用中等焊剂	优秀，使用中等焊剂
稳定性	基本与铜一样，除合金化降低腐蚀率外	基本与铜一样，除合金化降低腐蚀率外	基本与铜一样，除合金化降低腐蚀率外	基本与铜一样，除合金化降低腐蚀率外	好的，易氧化，遇氯化物和硫化物会变色，结合面不宜用含硫的绝缘	好的，易氧化，遇氯化物和硫化物会变色，结合面不宜用含硫的绝缘

2.1.2　镀层线的额定（长期）工作温度

根据 GJB—773A—2000 航空航天用含氟聚合物绝缘电线电缆通用规范的规定，其中所用的镀银铜线、镀镍铜线、镀锡铜线、镀银铜合金线和镀锡铜合金线，它们的额定（长期）工作温度规定如表 3.6-79 所示。从锡、银、镍和铝的材料而言，其耐热性决不止表列数值，表中数值主要取决于绝缘材料。

2.1.3　电镀效果

镀银和镀镍都用电镀法镀制，而且一般都是先电镀后拉（拉到成品线的尺寸）；镀锡则有电镀和热镀法两种，而热镀往往是先拉（到接近成品线径）后热镀。有关电镀的效果见表 3.6-80。

表 3.6-79 额定（长期）工作温度 ℃

线 种	导电线芯的额定（长期）工作温度	
镀锡铜或铜合金线	150（135）	−65（−55）
镀银铜或铜合金线	200	−65
镀镍铜或铜合金线	260	−65
铝线	150	−65

注 括弧中数值因高温绝缘电线用绝缘材料品种的不同而有所不同。

表 3.6-80 电镀的效果

特性	镀 银	镀 锡	镀 镍
电导率	稍有改善，约 102%IACS	镀锡层和金属间化合物降低电导率	镍和镍铜合金降低电导率
外径控制	模具磨损小，易于控制公差（±1%）	模具磨损大，不易于控制公差（±3%）	同镀锡
重量控制	良好，有利于控制重量－电导率比和外径	电导率较低，不易控制外径，致使重量控制较差	同镀锡
弯曲性能	在 200℃ 下热时效（老化），弯曲性能不减	在 125℃ 和 150℃ 下热时效（老化），弯曲性能显著下降	在 275℃ 下热时效（老化），弯曲性能不减
可压接性	优秀，接触电阻小，但在 200℃ 热时效（老化）后，接触电阻稍有增加	好，可用压接工具，但在任何温度下热时效（老化）后，接触电阻稍有增加	好，对硬镍表面，需要较大的压力
可焊接性	优秀	最初好，经长期贮存后变差	差，要用活性的熔剂
稳定性	有时发生电化腐蚀（红斑），个别条件下能与乙醇反应，高温下发生界面迁移。在 200℃ 下热时效（老化），在显微镜下可看到晶须和球粒	铜锡之间产生金属间化合物，由此损失了铜，金属间化合物较脆，引起性能变化	同心反向或同心复绞时，线股之间会因磨损而露铜

2.1.4 芯线结构型式的影响

线芯结构主要有“同向绞合”［同向、同节距和同心绞合结构，见图 3.6-54（a）］、“反向绞合”［反向、不同节距和同心绞合结构，见图 3.6-54（b）］、“束绞合”和“复绞合”四种型式。“同向绞合”型式最易控制直径和重量，其直径可在相等的电导率下做得最小，从而需要最少的绝缘材料，故同向绞合在经济和性能上是合理的；“反向绞合”型式在性能上与同向绞合型式很相近，但因前者线径较大，故直径和重量控制稍差，其电阻比同向绞合型式稍小；“束绞合”型式的直径和重量控制不易掌握，因为其形状不规则；“复绞合”型式直径和重量的控制取决于所采用的型式。一般说来，线芯中股数越多，束绞合和复绞合越不好控制。在选用各种绞合型式时，与股线相同的其他绞线相比，“同向绞合”线的柔软性最佳。从应用方面考虑，增加单线根（股）数或者使用高强度合金单线，可提高绞线的柔软性。从机械式接头来看，同心绞合（同向或反向）比较合适，因为这种绞线密度较大。束绞（合）线不易制作机械式接头，由此通常采用钎焊。“同向绞合”线的热老化特性也较好，最适用于制造挤出型和绕包型的薄壁绝缘电线。有关线芯绞合型式的影响如表 3.6-81 所示。图 3.6-55 示出了导体尺寸对热老化后镀银铜导体弯曲寿命的影响。图 3.6-56 示出了绞合结构型式对电阻的影响。图 3.6-57 示出了绞合结构型式对热老化后镀银铜导体弯曲寿命的影响。

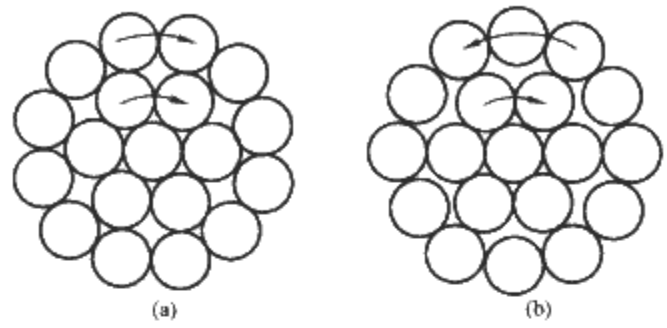


图 3.6-54 同向绞合和反向绞合型式的几何结构排列方式

（a）同向、同节距和同心绞合结构（同向绞合）；（b）反向、不同节距和同心绞合结构（反向绞合）

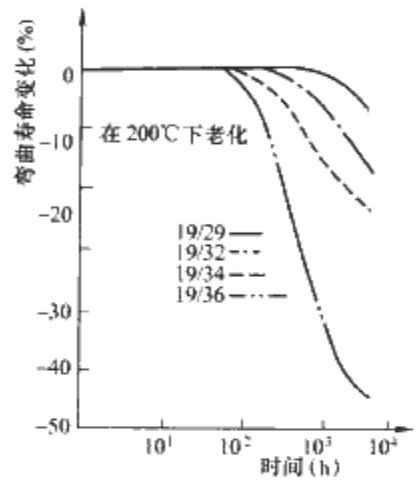


图 3.6-55 导体尺寸对热老化后镀银铜导体性能的影响

注：图中股线数/AWG 线规号。

表 3.6-81 线芯绞合型式的影响

特性	同向绞合	反向绞合	束绞合	复绞合
电导率	比反向同心绞稍差	比同向同心绞稍好	设计与等效的实心线电导率相等	通常设计与等效实心线电导率相等，除 19×7 结构比较大外
外径控制	外径控制最好，外径较小	优于束绞或复绞	外径控制差，因无几何结构	外径控制取决于结构，股数越多越难控制
重量控制	最好，电导率相等时重量最轻	好	差，但对束绞通常是不重要的	重量控制取决于结构；股数越多越难控制
弯曲性能	比反向同心绞合好	与相等股数的其他绞合型式相比，弯曲性能最差	弯曲性能取决于股数，股数越多越柔软	因股数较多，故弯曲性能最好
可压接性	同心绞合最好	同心绞合最好	常用焊接，压接质量差	好，取决于结构
综合	外径控制优秀，表面光滑，用于挤出型和绕包型薄壁绝缘电线	外径控制非常好，表面光滑，用途同左	一般用于温度低的厚壁绝缘电线	可与绝缘共用，取决于结构

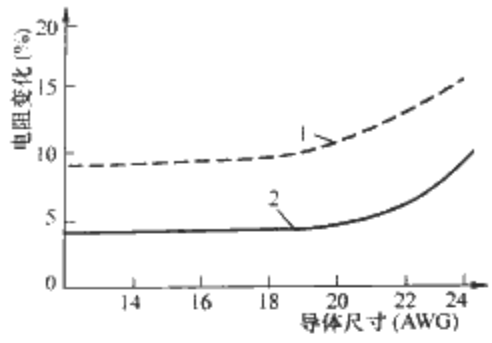


图 3.6-56　绞合结构型式对电阻的影响
（在 200℃下，历时 2000h 热老化的镀银铜导体）
1—反向、不同节距和同心绞合型式；2—同向、同节距和同心绞合型式

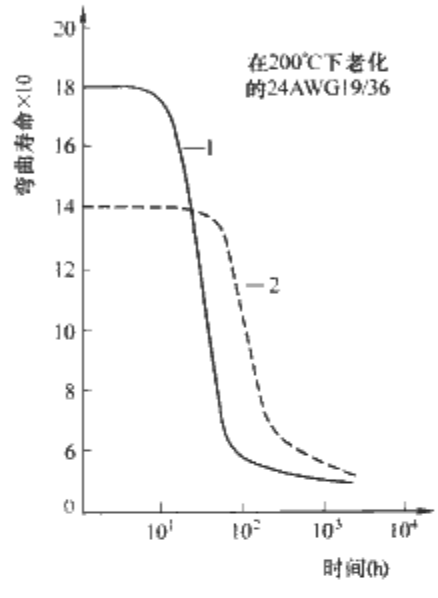


图 3.6-57　绞合结构型式对热老化后镀银铜导体弯曲寿命的影响
1—同向、同节距和同心绞合型式；2—反向、不同节距和同心绞合型式

2.2　镀锡铜线和镀锡铜包钢线

2.2.1　镀层的材料、厚度和可焊性质量标准

目前大量应用的是纯锡和锡铅合金。锡铅合金镀层耐腐蚀性好、熔点低、钎焊性好，含锡 60%～70%的锡铅合金镀层多用于电子元器件引线以提高其可焊性。

保护性镀层的厚度应按镀锡线标准和质量要求而定。至于可焊性镀层的厚度应根据具体元器件提出不同引线的厚度规范，过分强调厚度大而忽视耗用锡的经济性是不恰当的。从有关资料和一些元件厂的要求来看，引线镀锡层厚度至少应在 3μm 或 5μm 以上，甚至达到 10～15μm。国外镀锡铜包钢线的镀锡层标准厚度，有的分为四个等级，即，特厚级—(14±2)μm、厚级—(10±1)μm、中厚级—(6±1)μm 和薄级(2±1)μm。

为了提高镀层的可焊性和焊接温度，开发新的锡合金镀层已为人们所关注。锡的可焊性虽优良，但纯锡容易引起"锡瘟"，且久置容易与铜基体生成金属间化物而降低可焊性，从而开发了锡铈合金，这种材料可以避免上述缺点，有效提高焊接温度，且可焊性仍佳；锡和锡铅合金镀层在常温条件下的钎焊性良好，并具有耐蚀性，但镀层成分不易控制，镀层氧化后的钎焊性变差，为此开发了镀层经氧化后钎焊性仍好的锡锌合金镀层。锡含量均为 80%的锡锌（镀液的主要成分见表 3.6-82）和锡铅镀层在相同镀层厚度、钎焊工艺条件下进行对比试验表明：锡锌镀层的钎焊性（尤其是镀层经氧化处理后）、稳定性均好于锡铅合金镀层，而两种镀层在氧化处理（185℃，2h）前后的接触电阻值接近，说明两者的导电性能基本一致，能满足电子元器件对引线镀层导电性的要求；此外，从电镀的工艺入手以提高可焊性。目前我国现有的酸性镀锡光亮剂的最佳电流密度较低，因而很难适应高速电镀（走线速度 60～400m/min，工作电流密度大）的要求，难于得到可焊性好的镀层（由于上述原因导致高温老化后失去可焊性）。采用光亮镀液使镀层表面结晶光亮致密，可以提高镀层抗氧化能力，同时尽量减小有机夹杂物，从而使铜引线镀锡层具有好的可焊性。据报道，针对国产酸性镀锡光亮剂的不足，开发了一种初级光亮剂，可在 1～20A/dm² 下获得银白色的镀锡层。与现有的光亮剂配合使用可得到光亮镀层，8μm 厚的镀层可抗 200℃，1h 老化，具有较好的可焊性。另外用钒盐与有机酸组成复合抗氧化剂，使得镀液长时间保持稳定，也有利于提高镀层的可焊性。表 3.6-83 示出了电镀液的组成，表 3.6-84 示出了镀层可焊性的测试结果。

表 3.6-82　　锡锌镀液的主要成分

成分	柠檬酸	柠檬酸三铵	硫酸亚锡	三乙醇胺	硫酸锌	稳定剂	光亮剂
含量	80g/L	60g/L	25g/L	10g/L	35g/L	15ml/L	10ml/L

表 3.6-83　　镀液组成

组　成	镀液	组　成	镀液
硫酸亚锡(g/L)	45	蛋白胨(g/L)	4
浓硫酸(g/L)	110	酚磺酸(g/L)	25
钒盐(g/L)	1	初级光亮剂 DL(mL/L)	8
有机酸(g/L)	10	乙—甲基醛缩苯胺(mL/L)	8

表 3.6-84　　镀层可焊性测试结果

处理条件	测定项目	电流密度（A/dm²）				
		1	4	10	18	20
未老化	F_m（10^{-5}N）	−80	−79	−75	−78	−76
	t_2（s）	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7
老化（200℃，1h）	F_m（10^{-5}N）	−41	−48	−47	−41	−45
	t_2（s）	1.0	0.9	1.0	1.1	1.2

注　F_m—润湿力；t_2—零交时间；可焊性采用润湿称量法测定，仪器为 SKC—2H—1。

有关镀锡层的质量标准，有三个指标是关键的，即镀锡层的连续性、附着力（性）和可焊性。随着微电子技术的发展，很多引线的表面安装器件的应用越来越多，引线间距不断缩小（<0.1mm），浸焊料已不能满足质量要求，焊料镀将成为标准的引线的镀制工艺。铜线镀锡或锡合金便是焊料镀之一。衡量镀层可焊性的依据是镀层老化前后的润湿力及零交时间。一般老化的条件是 155℃、16h。但随着焊接速度的加快，对铜引线可焊性要求更高。因而，铜引线镀锡层的老化条件改为 200℃、1h。目前国内的一些企业依据该条件的老化结果、判别铜引线老化后的可焊性。

2.2.2　镀锡铜（铜包钢）线的制造

（1）电镀法。电镀法和热镀法相比，生产率高，镀层的均匀性、连续性和附着力较好，在耗锡量相同时，电镀锡可容易达到高标准的要求，耗锡量较低，能耗比较低，成本比较低。电线电缆用的镀锡铜线是保护性镀锡，与电子用要求的可焊性有所不同，但用电镀法生产的镀锡线的可焊性比热镀锡线也有提高。电镀法的工艺流程如图 3.6-58 所示。铜

线的电解镀锡，镀锡和锡铅合金的电镀液主要有氟硼酸盐、氟硼酸—氨基磺酸盐、酚磺酸盐、柠檬酸盐和甲基磺酸体系镀液等，一般采用氟硼酸型酸性电镀。特点是电流密度大、效率高、镀层质量好。氟硼酸型电镀液的组成大致如表 3.6-85 所示。在必要时镀液中可加入添加剂，其目的在于提高镀层的覆盖能力和细化晶粒，消除“树枝现象”，并防止 Sn^{++} 氧化成 Sn^{++++}。为了节约回收材料，对于不合格的铜线镀锡层，可以用以下两种配方的溶液和工艺进行退镀。

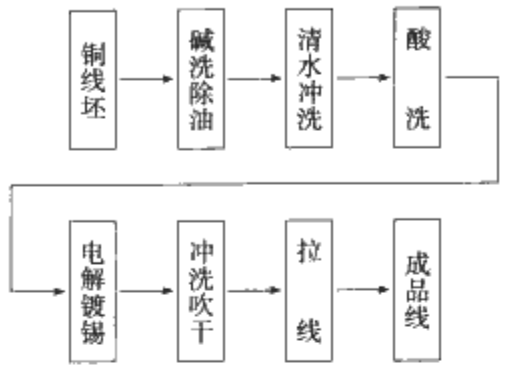


图 3.6-58 电镀法工艺流程

表 3.6-85 氟硼酸型电镀液组成

组 成	含量 (g/L)	组 成	含量(g/L)
氟硼酸亚锡 $Sn(BF_4)_2$	175～200	胶冻	6
二价锡 Sn^{++}	70～80	邻苯二酚	2
游离氟硼酸 HBF_4	100～150	β-萘酚	2
硼酸 H_3BO_3	25	水	—

电解液 pH 值≤0.2；工作温度 35～45℃；纯锡品位 99.9%；阴阳极面积比 1∶2；最大电流密度 40A/dm²

配方和工艺之一：

NaOH 溶液，50～60g/L。

温度，60～70℃。

阳极电流密度，1A/dm²。

配方和工艺之二：

NaOH 溶液，150～200g/L。

NaCl 溶液，15～30g/L。

温度，80～100℃。

阳极电流密度，1～5A/dm²。

退镀以后的铜线表面呈黑色。只要用 HBF_4 酸液洗去发黑层，并将铜线冲洗干净，即可重新电解镀锡。

为了发挥电解镀锡工艺的优点，需要在镀锡后进行拉线和连续退火。凡不需退火的镀锡线（如 0.1mm 以下的细线和电子元器件引线等）可以采用电镀工艺生产。镀锡铜线的拉线性能和特性强烈地受到铜与锡之间性能关系的影响。从锡—铜的相图可知（见图 3.6-59），在低温下，铜相对于镍（见镀镍铜线节）是惰性的，然而铜和锡具有较高的互相作用的趋向。作用的结果是锡向铜中扩散引起锡和铜的合金化，形成金属间合金，这种合金比锡和铜都硬。由于锡向铜扩散形成了局部的基体硬化区，这种局部的硬化区是断断续续的，从而阻碍了正常的拉线，招致金属过拉线模时产生断线（见图 3.6-60）。当锡镀在表面有缺陷的铜线上时，锡趋于进一步的扩散，并且通过表面缺陷扩散进入铜比无缺陷的地方快。此外，锡趋于占据微裂纹和表面缺陷。当拉线时，通过塑性变形施加了力和发生了热，使锡发生反应进一步向铜中扩散。最初，合金化的或扩散的区仅占整个截面的一小部分。然而在而后的拉线阶段，铜线大多数的韧性部分比合金化的部分更易流动。由此，锡—铜合金化材料的截面与韧

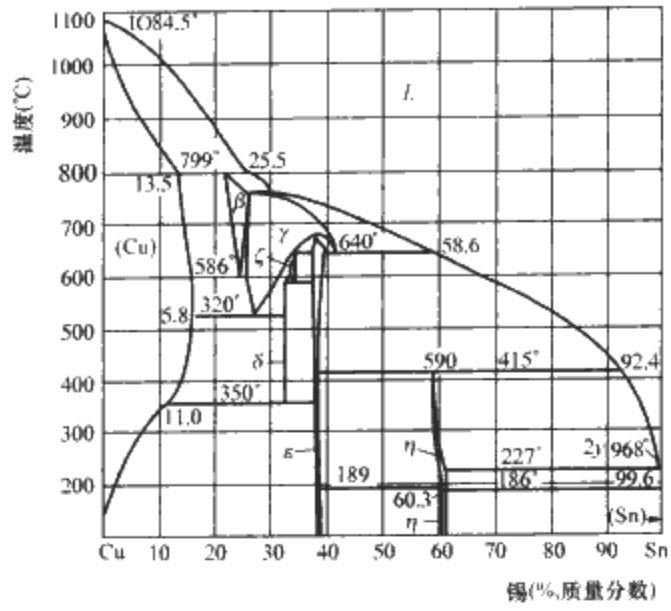


图 3.6-59 锡—铜相图

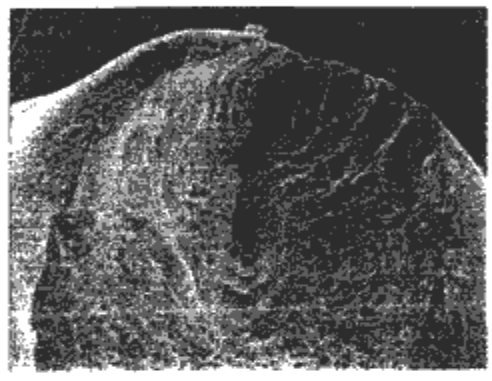


图 3.6-60 由锡扩散引起的断线（600 倍）

铜部分的体积相比变得越来越大。锡扩散区的韧性差，显得更有碍变形。通常由于锡扩散的拉丝断线（见图 3.6-87）都具有脆性断线的特征，而不是韧性断线。在这些断线的大多数中心部分常常能看到含有裂纹的脆性破断的表面。这些裂纹常常是在镀锡前，在拉铜线时早就形成的缺陷的残余。锡透入由拉线引起的表面缺陷趋于保护裂纹。在这些缺陷附近锡的扩散，由于局部合金区的产生保护了它们进一步的变形。

在镀锡铜线中不是所有的质量问题都归因于锡的扩散或由电镀产生的。然而扩散破坏的特征的确能在镀锡铜线拉断的断口上看到。有关锡与铜的附着力问题，由于锡和铜的相互作用，锡很大程度上助于促进附着力的增加，所以电镀锡的附着力与电镀镍（镀镍铜线）的附着力相比是不敏感的。

（2）热镀法。随着电子工业的蓬勃发展，许多整机和元器件厂对元件引线的耐蚀性和可焊性提出了更高的要求。作为电子元器件引线用的镀锡铜线，如其镀锡层太薄，使用中又直接暴露在空气中，显然满足不了对引线耐蚀性和可焊性的要求，为此必须增加镀锡线镀层的厚度。连续热镀法简单易行，投资少，生产效率尚高，可获得一定的镀层厚度，且镀层致密，结合牢固，孔隙少。特别在带状电缆用的线芯中，采用先绞后镀的生产工艺时，需要热镀法。因此，它不失为铜线镀锡的一种可取方法。热镀法的工艺流程如图 3.6-61 所示。采用盐酸或氯化锌溶液酸洗，热镀温度 250～300℃，热镀速度 50～120m/min。采用热镀法生产的镀锡铜线，其镀层厚度的均匀性尚有值得进一步提高的余地。

1）热镀层组成对耐蚀性和可焊性的影响。热镀纯锡层，可看作是在 300℃ 左右温度下液态锡（大量的）的固态铜（少量的）的相互作用。据锡—铜相图（图 3.6-59）可知，铜在锡中或锡在铜中的溶解度都是极其微小的，不可能形成

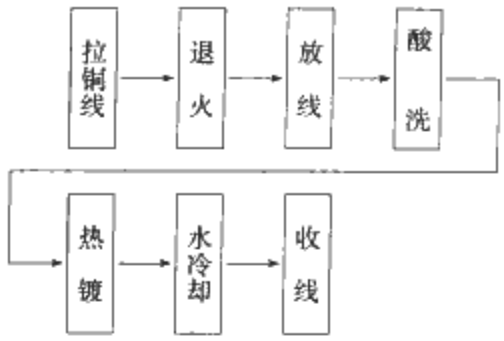


图 3.6-61　热镀法工艺流程

完全共溶的固溶体。沿用状态图，可近似地认为，锡在热镀及在线材表面凝固过程中，在界面上，首先与铜形成化学化合物 CuSn 为基的固溶体，冷却过程中会发生共析转变，主要形成化合物 Cu_6Sn_5，只有微量的 Cu_3Sn。对 1μm 左右厚度的纯锡镀层做能谱扫描分析表明：从铜基体与锡的交界面，直到镀层的外表面，都有铜原子存在，镀层里外各点，铜和锡的含量大致相同，铜约占 55%，锡约占 45%。可见，薄镀层的镀锡铜线，实际上不是纯锡镀层，而是化合物层。该铜锡化合物层暴露于空气中，尤其是含有氨、硫、氯化氢等的情况下，容易受腐蚀，这也许是薄镀层镀锡铜线容易发黄并导致可焊性差的原因。

在热镀厚层镀锡铜线情况下，锡首先与铜表面形成化合物层，由于铜基体已被此界面层覆盖，外面附着的将是纯锡层。这种镀锡铜线经存放或使用，表面亦会形成一层氧化薄层，这时镀层已由三层组成，即表面氧化层、纯锡层、Cu_6Sn_5 化合物层，底层为铜基体。随着时间的推移，化合物层逐渐向外扩散，“吞食”中间的纯锡层，外表氧化层亦向内深入，浸蚀纯锡层，但这种扩散和浸蚀速度都是非常缓慢的，只要有足够厚度的纯锡层，即使长时间存放，纯锡层也不会被“吞食”完。因此，厚层镀锡铜线仍然没有失去良好的耐蚀性和可焊性。所以，作为电阻、电容等引线用的镀锡铜线，保证必要的镀层厚度是重要的。

热镀锡一铅合金层时，在 250～300℃范围内，液态锡铅已合金化，由于锡在铜中溶解度极小，铅则完全不溶于铜中而以单纯的铅质点存在。因此，在热镀时形成化合物的可能性很小，锡铅层几乎机械地附着于铜线表面。从锡一铅状态图可知，锡和铅形成共晶型结构，共晶体的多少与含量有关。当锡为 61.9%、铅为 38.1%时，形成完全的共晶结构，当铅含量少于 38.1%时，为亚共晶，多于 38.1%时，为过共晶。通常把含铅 38%～40%的焊料称为“共晶焊料”，是国内外普遍使用的可焊性极好的电工焊料。

纯锡中加入铅，降低了熔点，提高了镀层的致密程度和可焊性。锡铜 30，尤其是锡铅 40，由于固相线和液相线相距甚近，熔化范围很窄，极易熔化亦极易凝固，具有极佳的流动性，这对于提高可焊性是十分有利的。由于迅速凝固，所得晶粒细密，所以镀层致密。

一般，铅加入锡中会使锡的耐蚀性降低，但由于形成的共晶结构比纯锡致密，在漏镀情况下，镀层的耐蚀性反而稍有增加。经做过硫化钠试验（见表 3.6-86）表明，在盐酸和过硫化钠浸蚀中，锡铅 30 和锡铅 40 镀层比纯锡镀层的耐蚀性要好一些。

表 3.6-86　　过硫化钠试验结果

项　　目	薄层镀锡铜线	厚层镀锡铜线	镀锡一铅铜线
镀层厚度（μm）	1 左右	5～10	5～10
过硫化钠试验	2 周期产生黑斑或发黑	4 周期无黑斑，不变黑	6 周期无黑斑，不变黑

续表

项　　目	薄层镀锡铜线	厚层镀锡铜线	镀锡一铅铜线
155℃常压下烘烤	8h 微黄	16h 未变黄	24h 未变黄，也未变蓝
可焊性①	较差	好	好

① 可焊性试验是在经 40℃、95%湿度、48h 热潮试验之后进行。

锡中加入铅还带来一个不可忽视的好处，即阻止了纯锡的同素异构转变。锡在低于（－30～－20)℃时，极易发生结构上的转变，即从白锡（β—锡结构）变为粉状的灰锡（α—锡结构），通常称为“锡疫”。因此，在严寒地区限制了纯锡的使用，无论是含有镀纯锡的线缆线芯，或是装于元件、整机上的镀纯锡引线，都有发生“锡疫”的可能。这一点应引起足够的重视，建议除了非用纯锡不可之外，尽可能以锡铅代纯锡，这不仅仅是为了严寒条件下安全可靠，而且能节约大量昂贵的金属锡，其经济效益是十分明显的。

2）热镀方式的影响。通常采用卧式热镀，即线材自始至终呈水平方向运动。由于过线模（亦称揩锡模）孔通常比线径大，线材总是紧贴模孔的下半周，得到的镀锡线往往下半周薄，上半周厚，极不均匀，厚度亦难于保证。

采用立式热镀，线材先从水平方向斜着进入锡锅，经过埋入锡锅的导向轮转为垂直方向，然后进入平放着的模子。模子圆周方向不予固定，使线材过模时模子能自由微微浮动和在水平方向移动，这样，线材能在模孔中自动对中心，所得镀层均匀性大为改善，而且能得到一定的厚镀层。

在立式热镀中，由于锡、锡铅的流动性好，加上熔融金属的自重作用，要粘滞足够的锡流垂直向上是很不容易的。尤其是热镀锡铅合金层，铅的密度大，附着力比锡差，要镀出厚的镀层比较困难。为此，须设计和采用引锡模，使露出锡锅后的线材能粘滞足够的厚锡流进入过线模。引锡模至过线模的距离要适当，能使熔融金属逐渐冷却呈半凝固状态，而后才进入过线模，这样才不致使黏滞的锡被过线模挤掉而得不到厚镀层。选择适当尺寸的引锡模和过线模也是很重要的。

3）热镀温度和速度的影响。热镀温度直接影响着镀层质量和厚度。热镀温度高（例如高于 320℃），熔融金属流动性好，锡中某些杂质和表层氧化物在锡锅中下沉或上浮，所得到的镀层中的夹杂，针孔等缺陷少，表面光洁度也高。但温度高，形成铜一锡化合物的可能性大，致使热镀时或其后存放中镀层容易发黄。温度高，流动性好，会使熔融金属附着能力降低，一旦进入模子亦容易被挤出来，难以得到厚的镀层。

热镀温度过低（如低于 250℃），流动性太差，锡锅表层氧化物和锡中杂质容易进入镀层。显微镜观察镀层表明，温度越低镀层中的夹杂和针孔等缺陷越多。另外，温度过低，粘滞于线材表面的锡流过早凝固，所得镀层粗糙，在显微镜下观察，镀层呈火山岩浆状，甚至有结瘤等现象。所以，热镀厚层镀锡线时，必须严格控制温度。

热镀速度，一般取决于热镀温度和铜线埋入锡锅的长度。温度高时，速度应增加；埋入长度长，速度应增加。但在热镀厚层镀锡线时，首先要考虑能获得厚的镀层，即始终保证线材能带上足够的锡流上达过线模。速度太高不可能获得厚镀层；太低影响生产率。

4）冷却的影响。从模子出来的镀锡铜线温度接近锡或锡铅的凝固点，及时地给予水冷却可以防止晶粒长大，尤其

对锡铅镀层，激冷能获得细密的共晶结构。冷却水量应调节到既不粘结转向导轮，又能利用冷却后线材本身的余热干燥表面，不致于带水进入收线轴。

5）镀锡模——引锡模和过线模的影响。引锡模的设计应以能够使线材带上足够的锡流进入过线模为前题。

过线模使用陶瓷模、碳化钨模和钻石模的对比试验表明：钻石模比较理想；陶瓷模导热性差，模口易结锡；碳化钨模若能保证精确的尺寸和内孔光洁度亦可以使用。

随着厚层热镀锡工艺的不断完善，应设计出专用的热镀锡模具。采用短的承线区和短的变形区（指拉丝模内孔结构区）的模子比较适宜，因为长的承线和变形区不易通过半凝固状态的金属锡，会把带入的锡流挤掉而得不到足够厚的锡层。

6）先绞合后热镀锡的整体镀锡铜线芯。在计算机和通信设备中用的带状电缆，其导电线芯采用先绞合后热镀锡的整体镀锡铜线芯，有利于降低成本和提高质量。这种先绞合后镀锡的整体镀锡铜绞线，既具有绞线的柔软性，又具有镀锡铜单线表面光滑、圆整、锡层连续的特点，其物理机械性能明显优于通常的镀锡铜绞线。

先绞后镀生产工艺流程如图 3.6-62 所示。酸洗采用氯化锌、盐酸、氯化铵和水的混合液，其中氯化锌和盐酸的浓度稍高于铜单线镀锡用酸洗液的浓度，酸洗长度不小于 15cm；镀锡槽温度 250～280℃；刮锡模孔径为绞线计算外径的±0.2mm；刮锡模的模架角度的调整以锡槽中的压线导轮的压线点、刮锡模中心点及导轮架上的支撑点在一条线上为准；收线速度 1～3m/s。

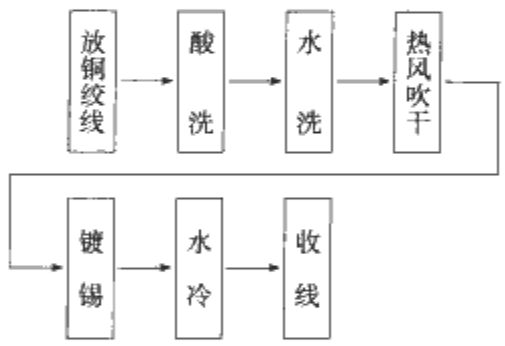


图 3.6-62 先绞后镀生产工艺流程

2.2.3 镀锡铜线和镀锡铜包钢线的标准及性能要求

（1）GB/T 4910—1985 镀锡圆铜线标准及性能要求。GB/T 4910—1985 标准适用于制造电线电缆及电器制品用的镀锡软圆铜线。镀锡铜线共分两个型号，即 TXR 型镀锡软圆铜线和 TXRH 型可焊镀锡软圆铜线。镀锡铜线的伸长率和电阻率应符合表 3.6-87 要求，直径偏差应符合表 3.6-88 要求。标准对镀层的连续性和附着力规定为："镀锡层应是连续的。经多硫化钠溶液试验后的试样表面应不变黑，或经过硫酸铵溶液试验后，试验溶液的色泽应不深于标准比色溶液的色泽。镀锡层应牢固地粘附在铜线的表面上，镀锡铜线按表 3.6-89 规定卷绕，并经浸渍试验后，试样螺旋卷绕部分的外周表面应不变黑，镀层应无裂纹。对 TXRH 型镀锡铜线的可焊性，规定焊接时间不大于 2s。

表 3.6-87 伸长率和电阻率

标称直径 d (mm)	伸长率（%） ≥	电阻率 ρ_{20}（Ω·mm²/m）≤	
		TXR	TXRH
0.05<d≤0.09	6	0.018 51	0.018 51
0.09<d≤0.25	12	0.018 02	0.018 31

续表

标称直径 d (mm)	伸长率（%） ≥	电阻率 ρ_{20}（Ω·mm²/m）≤	
		TXR	TXRH
0.25<d≤0.50	15	0.017 70	0.017 93
0.50<d≤2.00	20	0.017 60	0.017 75
2.00<d≤4.00	25	0.017 60	0.017 75

表 3.6-88 直径偏差

标称直径 d（mm）	偏差（mm）
0.050<d≤0.125	+0.006 −0.003
0.125<d≤0.400	+0.010 −0.004
0.400<d≤4.00	+2%d −1%d

表 3.6-89 卷绕试验要求

标称直径 d（mm）	试棒直径（mm）不大于
d≤0.68	4d
d>0.68	5d

（2）美国 ASTM B520—2002 电子用镀锡铜包钢线标准及性能要求。该标准适用于电子用的镀锡铜包钢线。镀锡铜包钢线分为四个级别（见表 3.6-90）。镀锡铜包钢线的基础材料之一的锡，其纯度为工业（商用）纯锡，除铜以外，其他的元素的总量应不超过 1%。另一个基础材料铜包钢线，其质量和技术规范均应符合 ASTM B452 的要求（见前铜包钢线节）。镀锡铜包钢线的规格和电阻率要求见表 3.6-91 和表 3.6-92。有关镀锡铜包钢线的抗拉强度和伸长率应符合 ASTM B452 中相应的铜包钢线级别和规格的要求。有关镀层的连续性应在绞制或绝缘以前的试样上用多硫化钠溶液进行试验确定。具体的试验方法（取样、试件处理、专用的溶液、试验程序）在标准中作了详细的规定。镀层应牢固地粘附在铜包钢线的表面上，镀层的粘附性应在绞制或绝缘以前的试样上用卷绕和浸渍试验确定。具体的试验方法（取样、试件处理、试验程序－卷绕试验、浸渍试验和判别）在标准中作了详细的规定。为了计算起见，镀锡铜包钢线的密度取 8.15g/cm³。

表 3.6-90 镀锡铜包钢线的级别

级别	标称电导率（%IACS）	级别	标称电导率（%IACS）
T30HS	电导率 30%的硬拉线	T40HS	电导率 40%的硬拉线
T30A	电导率 30%的退火线	T40A	电导率 40%的退火线

表 3.6-91 镀锡铜包钢线的规格

直径（mm）	面积（mm²）	直径（mm）	面积（mm²）
1.812 9	2.63	0.455	0.162
		0.404	0.128
1.612 8	2.08	0.361	0.102
1.450	1.65	0.320	0.080 4
1.290	1.31	0.287	0.064 7
		0.254	0.050 7
1.151	1.04		
1.024	0.823	0.226	0.040 1
		0.203	0.032 4
		0.180	0.0255
0.912	0.653	0.160	0.020 1
0.813	0.519	0.142	0.015 9
0.724	0.412	0.127	0.012 7
0.643	0.324	0.114	0.010 3
		0.102	0.008 11
0.574	0.259	0.089	0.006 21
0.511	0.205	0.079	0.004 87

表 3.6-92　　在 20℃下的最大电阻率

级　别	标称直径（mm）	电阻率（Ω·mm²/m）
T30HS 和 T30A	1.829 到 0.511（包括）	0.067 427
	0.511 到 0.287（包括）	0.073 148
	0.287 到 0.079（包括）	0.076 423
T40HS 和 T40A	1.829 到 0.511（包括）	0.048 742
	0.511 到 0.287（包括）	0.051 618
	0.287 到 0.079（包括）	0.053 280

2.2.4　镀锡铜线和镀锡铜包钢线的应用

镀锡铜线主要应用于电线电缆用的线芯、编织线和电子用引线等场合；镀锡铜包钢线在电子工业中主要用作铝电解电容器引线、晶体管、集成电路、钽电解电容器、薄膜电容器、各种线圈、脉冲晶体和中波变换器等元器件上的引线和绝缘线的绞合型或单线的线芯。

2.3　镀银铜线和镀银铜包钢线

2.3.1　镀银铜（铜包钢）线的制造

以前镀银铜线的制造工艺首先是铜线表面清洗，然后汞齐化，最后镀银。这种老工艺的主要缺点在于：由于在不良环境中，特别在高温条件下，铜原子向银层扩散，形成铜银扩散层，逐步扩散到银表面，使镀银铜线表面产生黑点，从而影响线材的电性能及焊接性能。

上海银木电器制造有限公司采用如图 3.6-63 所示的新工艺，改进了线材的质量。在银层和铜基体之间加上一层镍，阻挡了铜原子向银层表面的扩散，从而改变了银层表面的泛黄、黑点等变色现象。电镀镍的溶液由 $Ni_2SO_4 \cdot 6H_2O$、$NiCl \cdot 6H_2O$ 和 H_3BO_3 组成，pH 值控制在 2.5～4.5，温度为 45～75℃，并在溶液中添加若干添加剂；采用预镀银，取消汞齐化可减少环境污染；采用表面保护膜，可有效隔离外界有害气体（主要是：SO_2 和 Cl_2）的腐蚀，并又不影响镀银铜线的电阻和可焊性以及可满足镀银铜线在电线电缆后续加工中的要求；因为镍层表面极易氧化，因此，对电镀设备要求在镀镍后尽量减少在空气中的暴露时间外，同时，采用活化剂对镀镍表面活化。

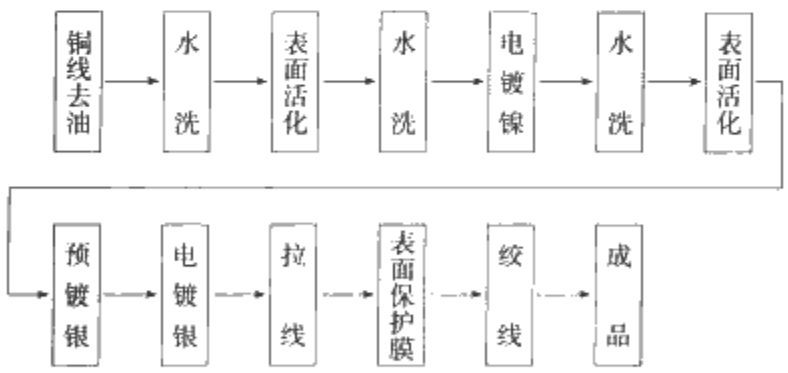


图 3.6-63　镀银铜线新工艺流程

2.3.2　镀银铜线和镀银铜包钢线的标准和性能要求

（1）JB/T 3135—1999 镀银软圆铜线标准及性能要求。该标准适用于制造电线电缆的导体、编织层及其他电气设备用的镀银软圆铜线。镀银铜线的型号为 TRY，其线径规格和级别如表 3.6-93 所示。线的标称直径偏差和机械性能应符合表 3.6-94、表 3.6-95 的要求。线在 20℃时的电阻率应不大于 0.017 241Ω·mm²/m，电阻温度系数 α_{20} 为 0.003 931/℃。银含量可用容量法或重量法（仲裁时）测定。镀层厚度通过测得的银含量按下式计算：

$$\delta = RGK$$

式中，δ 为镀层厚度，μm；R 为镀银线半径，mm；G 为银含量，%；K 为换算系数。系数 K 与银含量换算如表 3.6-96 所示。

（2）美国 ASTM B298—1999 镀银软的或退火的铜线标准和性能要求。该标准适用于电气装备（仪器）用的镀银软的或退火的铜线。镀银软的或退火的铜线共分五个级别（见表 3.6-97）。标准中对镀银铜线的抗拉强度不作规定，只规定伸长率（见表 3.6-98）；在 20℃下的电阻率应不大于 0.017 241Ω·mm²/m；镀银铜线的线径公差见表 3.6-99；关于镀层的连续性，标准规定：镀层应连续，其连续性试验应在绞制或绝缘前用多硫化钠溶液进行试验，并对试验的取样、试件处理、专用的溶液和试验步骤作了明确的规定；镀银层的厚度（仅供参考，不作考核的依据）以银含量的重量百分数为准，并应符合表 3.6-97 的要求；为了计算重量、面积等起见，取铜的密度为 8.89g/cm³，银的为 10.5 g/cm³；有关银层重量的测量方法——电子厚度试验仪法，在标准中亦作了详细的说明。

表 3.6-93　镀银铜线的线径规格、级别、银层厚度和银含量

级别	C 级	D 级	E 级	F 级	G 级	H 级	I 级
银含量（%）	4	6	10	12	15	18	20
标称直径(mm)	银层厚度（μm）						
0.05	—	—	—	—	—	2.3	2.7
0.07	—	—	—	2.0	2.6	3.3	3.7
0.08	—	—	—	2.3	3.0	3.7	4.2
0.10	—	—	2.4	2.9	3.7	4.7	5.3
0.12	—	—	2.8	3.5	4.5	5.6	6.4
0.14	—	—	3.3	4.0	5.2	6.5	7.4
0.15	—	2.0	3.5	4.3	5.6	7.0	8.0
0.16	—	2.2	3.8	4.6	6.0	7.4	8.5
0.18	—	2.4	4.2	5.2	6.7	8.4	9.5
0.20	—	2.7	4.7	5.8	7.5	9.3	10.6
0.23	2.0	3.1	5.4	6.6	8.6	10.7	12.2
0.26	2.3	3.5	6.1	7.5	9.7	12.1	13.8
0.28	2.5	3.8	6.6	8.1	10.5	13.0	14.8
0.30	2.6	4.0	7.0	8.7	11.2	14.0	16.0
0.32	2.8	4.3	7.5	9.2	12.0	14.9	17.0
0.35	3.1	4.7	8.3	10.1	13.1	16.3	18.6
0.37	3.3	5.0	8.7	10.7	13.8	17.2	19.6
0.39	3.4	5.3	9.2	11.3	14.6	18.1	20.7
0.41	3.6	5.5	9.6	11.8	15.3	19.1	21.7
0.45	4.0	6.1	10.6	13.0	16.8	20.9	23.9
0.50	4.4	6.8	11.8	14.5	18.7	23.2	26.5
0.53	4.7	7.2	12.5	15.3	19.8	24.6	28.1
0.56	4.9	7.6	13.2	16.2	20.9	26.0	29.7
0.60	5.3	8.1	14.2	17.3	22.4	27.9	31.8
0.63	5.5	8.5	14.8	18.2	23.6	29.3	33.4
0.67	5.9	9.0	15.8	19.4	25.1	31.2	35.5
0.71	6.2	9.6	16.8	20.5	26.6	33.0	37.6
0.75	6.6	10.1	17.7	21.7	28.1	34.8	39.6
0.80	7.0	10.8	18.9	23.1	29.9	37.2	42.9
0.85	7.5	11.5	20.0	24.6	31.8	39.5	45.1
0.90	7.9	12.2	21.2	26.0	33.7	41.8	47.7
0.95	8.4	12.8	22.4	27.5	35.5	44.2	50.4
1.00	8.8	13.5	23.6	28.9	37.4	46.5	53.0
1.05	9.2	14.2	24.8	30.4	39.3	48.8	55.7
1.10	9.7	14.9	26.0	31.8	41.1	51.2	58.3
1.15	10.1	15.5	27.1	33.2	43.0	53.5	61.0
1.20	10.6	16.2	28.3	34.7	44.9	55.8	63.6
1.30	11.4	17.6	30.7	37.6	48.6	60.5	68.9
1.40	12.3	18.9	33.0	40.5	52.4	65.1	74.2
1.50	13.2	20.3	35.4	43.4	56.1	69.8	79.5
1.60	14.1	21.6	37.8	46.2	59.8	74.4	84.8
1.70	15.0	23.0	40.1	49.1	63.6	79.1	90.1
1.80	15.8	24.3	42.5	52.0	67.3	83.7	95.4
1.90	16.7	25.7	44.8	54.9	71.1	88.4	100.7
2.00	17.6	27.0	47.2	57.8	74.8	93.0	106.0

表 3.6-94 镀银铜线标称直径偏差

标称直径（mm）	偏差（mm）	标称直径（mm）	偏差（mm）
0.050～0.100	±0.003	0.710～1.000	±0.015
0.110～0.250	±0.005	1.100～2.000	±0.020
0.260～0.700	±0.010		

表 3.6-95 镀银铜线机械性能

标称直径（mm）	抗拉强度 不小于（MPa）	伸长率 不小于（%）
0.050～0.100	—	5.5
0.110～0.150	196	10
0.160～0.250	196	15
0.260～0.500	196	20
0.510～1.000	196	25
1.100～2.000	196	25

表 3.6-96 系数 K 与银含量换算

G%（Ag）	4	5	6	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	50
K	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4	4.5	4.6	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.2	5.3

表 3.6-97 镀银铜线的级别

级 别	银含量至少占镀银线总重量的百分数（%）
A	1.25
B	2.50
C	4.00
D	6.10
E	10.00

（3）美国 ASTM B501—1999 电子用镀银铜包钢线标准和性能要求。该标准适用于电子用镀银的圆形铜包钢线。按银含量占镀银铜包钢线总重量的重量百分数分为 1.25、2.5、4.0、6.1 和 8.0 五个级别。有四个级别的铜包钢线，即 30HS、30A、40HS 和 40A 可用于制造镀银铜包钢线（见前，铜包钢线节）。对镀银铜包钢线的要求：线径规格及其公差，见表 3.6-100；抗拉强度和伸长率应符合 ASTM B452 中的相应规定（见前，铜包钢线节）；在 20℃下的电阻率应符合表 3.6-101 的要求；镀层的连续性，镀层应连续、连续性试验应在绞制或绝缘以前的试样上用多硫化钠溶液进行试验，并对试验的取样、试件处理、专用的溶液和试验步骤作了明确的规定；镀层的重量以线总重的百分数表示，并应符合不小于 1.25%、2.5%、4.0%、6.1%和 8.0%五个级别的要求。为了计算单位长度的重量和面积等起见，20℃时线的密度取 8.15g/cm³。

2.3.3 镀银铜线和镀银铜包钢线的应用

镀银铜线主要用作航空、航天、导弹、舰船和电气装备（仪表）等电线电缆（如高温安装线和高温射频电缆）的线芯（内导体）和外导体，而镀银铜包钢线在电子工业中主要在下列场合使用：

（1）当在电线电缆制造工艺中的烧结温度太高，不适宜采用镀锡铜线时，银层作为铜与绝缘之间的阻挡层。

（2）在高频电路中用的同轴导体的外导体，其股线之间要有低的接触电阻时。

（3）在高频电路（集肤效应）中用的导体，要有低的射频电阻时。

（4）对高温安装线要有好的可焊性，禁止使镀锡线时，因为在制造电线电缆的成品线时要用高的烧结温度。

表 3.6-98 镀银铜线的伸长率

直径（mm）	最小伸长率（%）标距 250mm	直径（mm）	最小伸长率（%）标距 250mm
3.260	30	0.360	20
2.910	30	0.320	20
2.590	25	0.290	20
2.300	25	0.250	20
2.050	25	0.230	15
1.830	25	0.200	15
1.630	25	0.180	15
1.450	25	0.160	15
1.290	25	0.140	15
1.150	25	0.130	15
1.020	25	0.110	15
0.910	25	0.101	15
0.810	25	0.088	15
0.720	25	0.078	15
0.640	25	0.071	10
0.570	25	0.064	10
0.510	20	0.055	10
0.450	20	0.051	10
0.400	20		

表 3.6-99 镀银铜线的线径公差

标称直径（mm）	直径允许公差（mm）
0.010 0 以下	$\pm 2.54^{-03}$
0.010 0 及以上	±1%

表 3.6-100 镀银铜包钢线的线径规格及其公差

线径（mm）	面积（mm²）	线径允许公差（mm）
1.829	2.63	
1.628	2.08	
1.450	1.65	
1.290	1.31	
1.151	1.04	
1.024	0.823	
0.912	0.653	
0.813	0.519	
0.724	0.412	±1%直径
0.643	0.324	
0.574	0.259	
0.511	0.205	
0.455	0.162	
0.404	0.128	
0.361	0.102	
0.320	0.080 4	
0.287	0.064 7	
0.254	0.050 7	
0.226	0.040 1	
0.203	0.032 4	
0.180	0.025 5	
0.160	0.020 1	
0.142	0.015 9	
0.127	0.012 7	±0.003
0.114	0.010 3	
0.102	0.008 11	
0.089	0.006 21	
0.079	0.004 87	

表 3.6-101　　镀银铜包钢线的电阻率

线的级别	电阻率（Ω·mm²/m）
30HS 和 30A	0.058 62
40HS 和 40A	0.043 97

2.4　镀镍铜线和镀镍铜包钢线

2.4.1　镀镍铜（铜包钢）线的电镀

制造镀镍铜线的工艺通常有两种，即硫酸盐镀镍工艺和氨基磺酸盐镀镍工艺，对于要求特高的耐高温电缆所用的镀镍铜线以采用氨基磺酸盐比较合适。

硫酸盐工艺的主要缺点在于：电镀时所用的阳极是电解镍板，则阳极面积较小，如所用电流密度稍大，则阳极产生钝化，为此必须加入数量较多的阳极活化剂——氯化物。但是，过多氯离子的存在，会使镀层内应力显著上升；镀液不循环或不搅动，镀层易产生针孔。为了消除针孔，添加十二烷基硫酸钠。但随着防针孔剂的加入，同时会增加镀层的硬度，降低延展性，不利于镀镍铜线的拉线；为了增加镀层延展性，要采用高浓度、高温度和低 pH 值的工艺。这样，所得镀层的结晶比较大，呈灰白色，必须经多道拉线后才有光泽。

氨基磺酸盐工艺的主要优点在于：工作槽中的镀液循环流动，这种镀液的分散性比硫酸镍溶液的分散能力好，可有效地减少镀层针孔的发生，因而不需添加防针孔剂，从而提高了镀层的韧性；采用去极化阳极（含硫 0.01%～0.04% 的镍冠或镍球），这种阳极与相同重量的电解镍板相比，其表面积大，且添加的微量硫可以使镍活化，因此在镀液中只要添加很小的氯化镍，就可以使阳极在溶解过程中保持活化状态。溶液中，氯离子的减少，使镀层内应力相对降低；氨基磺酸镍的溶解度大，溶液中金属离子含量高，有利于提高沉积速率。镀层结晶细致、具有光泽。因此，镀镍铜线不拉线，照样具有令人满意的外观；氨基磺酸镍镀液对污染的敏感性很低，在不少情况下，它所能容许的金属和有机杂质要比硫酸镍镀液高得多；从氨基磺酸镍镀液中所得的镀层比从硫酸镍镀液中所得的镀层具有更高的耐腐蚀性和更好的热稳定性，可以在高温下得到广泛应用。

氨基磺酸盐镀镍的工艺流程如图 3.6-64 所示。阴极电解除油，因制得的镀镍铜线不需拉线改变尺寸，可以直接使用，为了保证线径正确，不得采用阳极除油。否则，线径难于控制，除油工艺规范如表 3.6-102 所示；化学酸洗，为了除去残留在铜线表面上的除油剂和氧化物，酸洗工序是必要的。为避免过多杂质离子带入镀液，采用氨基磺酸进行化学酸洗比较合适。酸洗工艺规范见表 3.6-103；镀镍，镀镍的工艺规范见表 3.6-104。电镀所需时间可根据镀层厚度和电流密度以下式计算：

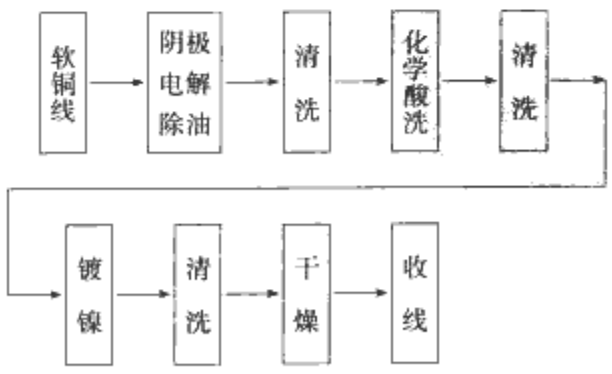


图 3.6-64　氨基磺酸盐镀镍工艺流程

$$t=\frac{\delta r 1000}{D_k \eta R}$$

式中：t 为电镀所需时间，h；δ 为镀层厚度，mm；r 为镍的密度，g/cm³；D_k 为阴极电流密度，A/dm²；η 为镀液的电流效率；R 为电化当量，g/（A·h）。

表 3.6-102　　除油工艺规范

项　　目	数值或规定
溶液成分（g/L）	
无水碳酸钠	50
磷酸三钠	50
温度（℃）	55～60
阴极	铜线
阳极	钢槽
阴极电流密度（A/dm²）	15～20①
搅拌	泵循环

①以铜线可见放气为准。

表 3.6-103　　铜线酸洗工艺规范

项　　目	数值或规定
氨基磺酸 NH_2SO_3H（g/L）	100～120
温度（℃）	常温下
搅拌	泵循环

表 3.6-104　　镀镍工艺规范

项　　目	数值或规定
电镀液成分（g/L）	
氨基磺酸镍［$Ni(NH_2SO_3)_2$］	320～350
氯化镍（$NiCl_2\cdot 6H_2O$）	5～6
硼酸（H_3BO_3）	35～40
pH 值	3.8～4.2
温度（℃）	50～55
阴极电流密度（A/dm²）	5～6
阳极	去极化镍球或镍冠，钛篮装，外包 PP 布袋
搅拌	泵循环

通常，氨基磺酸盐电镀在此工艺中的电流效率 η 为 99%，再根据电镀所需时间和单位铜线浸于镀液中的总长度，就可以计算出电镀时的收线速度。

2.4.2　镀镍铜线的拉线和退火

镀镍铜线的拉丝断线和退火问题直接影响劳动生产率和镀镍铜线的质量。近年来通过对电镀工艺条件的研究，利用扫描电镜、偏振光显微镜研究铜—镍扩散层和镀镍层晶粒的大小有了新的进展，将有助于镀镍铜线生产实践的改进。

（1）镀镍铜线的拉线。由镍—铜的相图（见图 3.6-65）可知，在低温下，铜相对于镍是无活性的（惰性的），不会有较高的互相作用的趋向。镍是一种硬性材料，它对晶粒尺寸和韧性非常敏感，在拉线时趋向脆性破坏的型式，而且这种断线的外貌往往被混淆，当作是通常正常的断线型式。镀镍铜线的拉线断线其主要原因是镍与铜分层、镍铜之间缺乏附着力和镀层性硬招致可拉性下降。这些原因与最佳的退火条件和电镀工艺密切相关。在镀镍层比较薄的情况下，如镍含量 4%时，镍的硬度不可能对拉线断线有明显的影响，但镍含量超过 7%～10%时，韧性对断线将起到重要的作用，

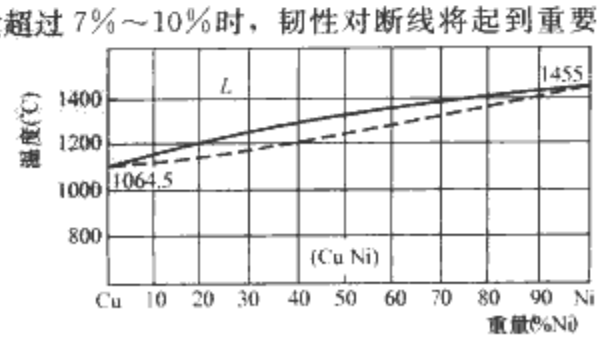


图 3.6-65　镍—铜相图

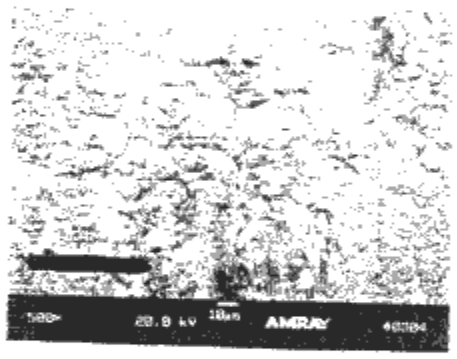
也是为改善断线可控制的重要因素之一。拉线断线归纳起来大致有下列 3 种：

1）镍层“分离”断线——其原因是镍铜之间缺乏附着力引起的，在拉线过模子时，外层镍与内层铜不同步变形，直到拉断。这种“分离的镍管”常常出现具有折迭层形式的“过剩材料”，它围绕着铜芯存在，而铜芯线则呈现拉断的“细颈”的特征。此外，镍层的晶粒尺寸太小，引起出现硬的镍层而招致断线。

2）“鱼嘴”形断线——由于电镀工艺不良，镀出的镍层太硬，属镀层的脆性破坏，张开的“鱼嘴”状态显示了“焊接的破坏”。由于镍硬、拉线阻碍流动和隐藏着内应力，故引起“镍壳”的破坏，这种破坏发生在外边，而不是在里边。

晶粒组织过细引起镀镍铜线的脆性断线，镍层的晶粒组织非常的细，晶粒直径约 1～2μm，且随意取向。在放大 500 倍下观察，线的表面光滑，所有细晶粒的镀镍铜线，在拉线时都出现了断线，其断口的型式不是类似于通常的拉断型式就是类似于“鱼嘴”型式的断线。

图 3.6-66 示出了具有满意的可拉性的韧性镀镍层的晶粒组织。该种组织晶粒比较大，表面比较粗。由偏振光显微照片可以看出，晶粒比较大，且是完全地长的，这种晶粒约宽 10μm 和长 60μm。在铜与镍的界面上晶粒比较小，且随意取向。这种界面上的小晶粒是很典型的，它是形成膜核的原始模式。大的柱状晶粒组织决定了线的可拉性，而且看起来镀层表面比较粗(必须指出：这种表面粗糙度的感觉在放大 500 倍下与用肉体触摸或在放大 20 倍下观察不是同一的概念)。



(a)



(b)

图 3.6-66 具有大晶粒的韧性镀镍层的组织

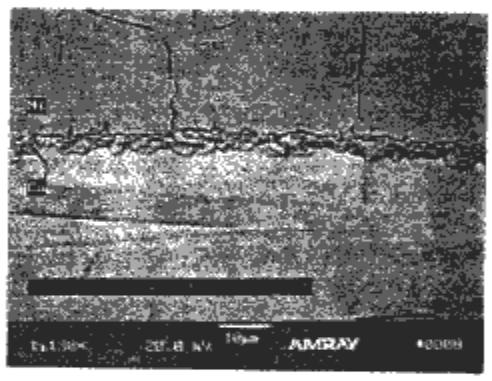
(a) 扫描电镜组织照片；(b) 横截面（放大 500 倍）

3）在镀层中的“结节瘤”断线——在镀镍工艺中带来的微粒会产生有害的影响。这种微粒可能成为结节瘤的晶核，并逐渐长大。结节瘤的形成是由于在局部的地方具有较高的沉积率（此处出现细晶粒），结节瘤比周围的基体硬得多，从而拉线时引起断线。

（2）镀镍铜线的退火。不管包复线或镀层线都对退火参数是敏感的。参数必须合适地选择，并严加控制。在镀镍的情况下，如温度高于最佳值，在铜、镍之间会引起分层和空腔。这样造成脆性和低的伸长率。

由于镍的退火温度明显高于铜，从而要获得退火的好处，在镀镍中应用就受到了限制，所以电沉积镍要注意采取合适的工艺条件，以便使沉积的镍具有要求的晶粒尺寸，为此避免不必要的过度退火。

通常，退火可增大晶粒尺寸，由此增加韧性和镀镍铜线的伸长率。然而退火亦引起铜、镍之间的界面反应，从而降低伸长率。界面反应减少了韧性界面，从而使附着力恶化。图 3.6-67 示出了在 537.8℃（1000 ℉）下退火后的晶粒尺寸，此时，镍已长成大的晶粒了。然而有严重的界面反应使伸长率下降。事实上，由于界面反应铜严重透入了镍的晶粒边界，这样使镍晶粒恶化。由于界面金属层具有脆性，所以造成界面层破坏和伸长率下降。此外，在高温下由于铜的迅速扩散而透入镍，这时较多的镍的晶粒边界就成了扩散的通道，结果提高了铜向镍晶粒边界的透入。铜进入镍的晶粒边界，将降低镍层的机械完整性，由此降低了镀镍线的伸长率，在图 3.6-68 中示出了退火温度对伸长率的影响。由图 3.6-68 可以看出：晶粒尺寸的增大与界面反应的进展同在，所以镀镍铜线应有一个最佳的退火温度，假如，退火时间恒定，在这一时间下，应在镍晶粒生长和界面反应之间有一个合适的平衡点。经实验发现，这个最佳温度大约为 398.9～454.4℃（750～850℉）之间，它取决于镍层厚度和退火的工艺条件。



(a)



(b)

图 3.6-67 镍层和铜线之间界面反应的横截面

(a) 扫描电镜照片；(b) 光学显微镜照片

2.4.3 镀镍铜线和镀镍铜包钢线的标准和性能要求

（1）GB/T 11019—1989 镀镍圆铜线标准和性能要求。该标准适用于制造电线电缆及电器产品用的镀镍软圆铜线。镀镍铜线的型号为：TRN。镀镍铜线的镍含量应符合表 3.6-105 规定，镍含量按电子测定法或化学测定法测定，仲裁时应采用化学测定法测定。镀镍铜线镍层表面应光亮、光滑连续。镀层应是连续的，经多硫化钠溶液试验后的试样表面应不变黑，镀层连续性试验的试样应在绞合或施加绝缘前选取。镍层重量所对应的镍层厚度小于 0.001 3mm 的镀镍

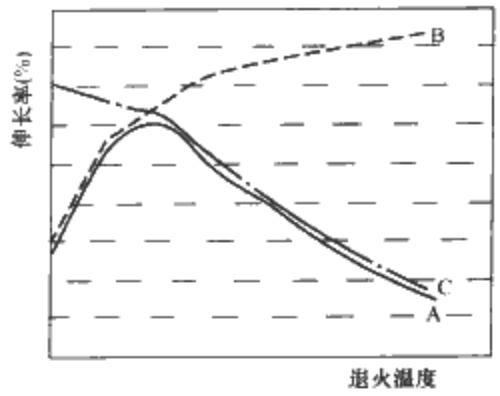


图 3.6-68　退火温度对伸长率的影响
—·— "A"；- - - - "B"；—·— "C"
A　镀镍铜线实际的伸长率；B—由于镍晶粒尺寸增大使伸长率增加；C—由于铜和镀镍层之间的界面反应使伸长率恶化

铜线，不要求进行镀层连续性试验。镀层连续性试验方法按 GB/T 4909.9 规定。镀层应牢固地附着在铜线表面上，镀镍铜线在与其自身直径相等的线上卷绕，并经浸渍试验后，试样螺旋卷绕部分的外周表面应不变黑，镀层应无裂纹。镀层附着性试验方法按 GB/T 4909.11 规定。镀镍铜线的直径偏差、伸长率和电阻率要求分别见表 3.6-106、表 3.6-107 和表 3.6-108。

表 3.6-105　　镀镍铜线的镍含量

级　别	2 级	4 级	7 级	10 级	27 级
镍含量（%）	2	4	7	10	27
标称直径 d（mm）	镍层厚度（mm）（仅供参考）				
0.05	—	—	—	0.001 3	0.003 4
0.07	—	—	—	0.001 8	0.004 8
0.08	—	—	0.001 4	0.002 0	0.005 5
0.10	—	—	0.001 8	0.002 5	0.006 8
0.12	—	—	0.002 1	0.003 0	0.008 2
0.14	—	0.001 4	0.002 5	0.003 6	0.009 5
0.15	—	0.001 5	0.002 6	0.003 8	0.010 2
0.16	—	0.001 6	0.002 8	0.004 1	0.011 7
0.18	—	0.001 8	0.003 3	0.004 6	0.013 2
0.20	—	0.002 1	0.003 6	0.005 1	0.014 7
0.23	—	0.002 3	0.004 1	0.005 8	0.016 5
0.26	0.001 3	0.002 5	0.004 6	0.006 6	0.018 5
0.28	0.001 4	0.002 8	0.005 1	0.007 4	0.020 8
0.32	0.001 6	0.003 3	0.005 6	0.008 1	0.023 4
0.35	0.001 7	0.003 5	0.006 2	0.008 8	0.023 9
0.37	0.001 9	0.003 7	0.006 5	0.009 3	0.025 2
0.39	0.002 0	0.003 9	0.006 9	0.009 8	0.026 6
0.41	0.002 1	0.004 1	0.007 2	0.010 4	0.028 0
0.45	0.002 3	0.004 6	0.008 1	0.011 7	0.033 0
0.50	0.002 5	0.005 1	0.008 8	0.012 6	0.034 1
0.53	0.002 7	0.005 4	0.009 4	0.013 4	0.036 1
0.56	0.002 8	0.005 7	0.009 9	0.014 1	0.038 2
0.60	0.003 0	0.006 1	0.010 6	0.015 2	0.040 9
0.63	0.003 2	0.006 4	0.011 1	0.015 9	0.043 0
0.67	0.003 4	0.006 8	0.011 8	0.016 9	0.045 7
0.71	0.003 6	0.007 2	0.012 6	0.017 9	0.048 4
0.75	0.003 8	0.007 6	0.013 3	0.018 9	0.051 1
0.80	0.004 0	0.008 1	0.014 1	0.020 2	0.054 5
0.85	0.004 3	0.008 6	0.015 0	0.021 5	0.058 0
0.90	0.004 5	0.009 1	0.0159	0.022 7	0.061 4
1.00	0.005 1	0.010 1	0.017 7	0.025 3	0.068 2
1.05	0.005 3	0.010 6	0.018 6	0.026 5	0.071 6
1.10	0.005 6	0.011 1	0.019 4	0.027 7	0.075 0
1.15	0.005 8	0.011 6	0.020 3	0.029 0	0.078 4
1.20	0.006 1	0.012 1	0.021 2	0.030 3	0.081 8
1.30	0.006 6	0.013 1	0.023 0	0.032 8	0.088 6
1.40	0.007 1	0.014 1	0.024 7	0.035 4	0.095 5
1.50	0.007 6	0.015 2	0.026 5	0.037 9	0.102 3
1.60	0.008 1	0.016 2	0.028 3	0.040 4	0.109 1
1.70	0.008 6	0.017 2	0.030 1	0.042 9	0.115 9
1.80	0.009 1	0.018 2	0.031 8	0.045 4	0.122 7
1.90	0.009 6	0.019 2	0.033 6	0.048 0	0.129 5
2.00	0.010 1	0.020 2	0.035 4	0.505 0	0.136 4

表 3.6-106　　线 径 偏 差

标称直径 d（mm）	偏差（mm）
0.050～0.250	$^{+0.008}_{-0.003}$
>0.250～1.3	$^{+3\%d}_{-1\%d}$
>1.300～2.000	$^{+0.038}_{-0.013}$

表 3.6-107　　伸 长 率

标称直径 d（mm）	伸长率（%）≥	
	2、4、7、10 级	27 级
0.050～0.100	12	6
>0.100～0.230	12	8
>0.230～0.500	16	12
>0.500～2.000	20	16

表 3.6-108　　电 阻 率

级　别	电阻率 ρ_{20}（Ω·mm²/m）≤
2	0.017 960
4	0.018 342
7	0.018 947
10	0.019 592
27	0.024 284

（2）ASTM B355—2003 镀镍软圆铜线标准和性能要求。GB/T 11019—1989 镀镍软圆铜线标准等效采用 ASTM B355—1980 标准，而 ASTM B355—1980 的版本在 1995 和 2003 年都再次获得确认，故在此不再重复叙述。

（3）ASTM B599—2002 电子用镀镍铜包钢线标准和性能要求。该标准适用于电子用镀镍铜包钢线。镍含量按镀镍铜包钢线总重量的重量百分数分为 2%、4%、7%、10%和 27%五个级别。镀镍铜包钢线按所用的基础材料——铜包钢线，分为四个级别，即

N30HS—标称电导率 30%IACS 的硬拉镀镍铜包钢线。

N30A—标称电导率 30%IACS 的退火镀镍铜包钢线。

N40HS—标称电导率 40%IACS 的硬拉镀镍铜包钢线。

N40A—标称电导率 40%IACS 的退火镀镍铜包钢线。

基础材料铜包钢线的质量和技术要求应符合 ASTM B452 的规定（见前铜包钢线节）。镀镍铜包钢线的线径规格见表 3.6-109；线的抗拉强度和伸长率应符合 ASTM B452 中的相应规定；线的电阻率应符合表 3.6-110 规定；对线的镀层的连续性、粘附性、镍含量及它们的试验方法在标准中均作了明确的规定和说明，基本上与 ASTM B355—2003 的相应规定相同；镀镍铜包钢线的直径偏差如表 3.6-111 所示；为了便于计算单位长度的重量、截面积等取线的密度为 8.15g/cm³（在 20℃下）。

表 3.6-109　　线 径 规 格

直径（mm）	截面积（mm²）	直径（mm）	截面积（mm²）
1.829	2.63	0.574	0.259
1.628	2.08	0.511	0.205
1.450	1.65	0.455	0.162
1.290	1.31	0.404	0.128
1.151	1.04	0.361	0.102
1.024	0.823	0.320	0.080 4
0.912	0.653	0.287	0.064 7
0.813	0.519	0.254	0.050 7
0.724	0.412	0.226	0.040 1
0.643	0.324	0.203	0.032 4

续表

直径（mm）	截面积（mm^2）	直径（mm）	截面积（mm^2）
0.180	0.025 5	0.114	0.010 3
0.160	0.020 1	0.102	0.008 11
0.142	0.015 9	0.089	0.006 21
0.127	0.012 7	0.079	0.004 87

表 3.6-110　　电　阻　率

电阻率，最大值，在 20℃下		
线的级别	镍含量（重量%）	电阻率（Ω·mm^2/m）
N30A 和 N30HS	2	0.059 06
	4	0.059 51
	7	0.060 21
	10	0.060 93
	27	0.065 43

续表

电阻率，最大值，在 20℃下		
线的级别	镍含量（重量%）	电阻率（Ω·mm^2/m）
N40A 和 N40HS	2	0.044 42
	4	0.044 90
	7	0.045 61
	10	0.046 36
	27	0.051 22

表 3.6-111　　线　径　偏　差

线径（mm）	线径偏差（mm）≤	线径（mm）	线径偏差（mm）≤
0.25 以下	+0.009 −0.003	0.25 及以上	+3%d −1%d

第7章 超 导 体

NbTi 和 Nb_3Sn 低温超导体（LTS）已实现产业化。铜氧化物高温超导体（HTS）的发现和快速开发，对超导体未来应用的前景发生了巨大的变化。银管包复的（Bi，pb）$_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$（BSCCO—2223）第一代高温超导带（1G线）现已实现产业化，2003 年由 BSCCO—2223 超导带制造的，具有工业实用价值的 500m 77kV/1kA 高温超导电力电缆在连续生产线上制造完成，并于 2005 年通过试验；2004 年我国采用国产 BSCCO—2223 超导带的第一组 30m，35kV/2kA 高温超导电缆系统示范工程在昆明市普吉电站并网试运行。$YBa_2Cu_3O_7$ 双轴织构镀膜的第二代高温超导带（2G 线）正在开发之中。据 2006 年 11 月报导，日本高温超导 YBCO 镀膜带的研发已达到了 I_c 为 245A，长 212m 的水平。日本《住友电工》自己称谓的“受控过压烧结大长度 Bi2223 第三代高温超导带（3G 线）已用于制造高温超导电缆，并进入商业性的工程承包。全世界公认，对高温超导体的大规模应用将首先在高温超导电力电缆上突破。MgB_2 超导材料的发现，为超导体大规模应用又提供了其他材料的选择。超导体有两个不同的应用市场，一个是在大多数的低温磁体上应用，如粒子加速器、核磁共振（NMR）和磁共振成像（MRI）磁体，核聚变发电用等离子体约束磁体和较小规模的研究用磁体等；另一个是更新的和潜在的规模更大的电工装备市场，如交流电力电缆、限流器、储能（飞轮蓄能发电、电磁蓄能发电）设备、变压器、电动机（船舶推进电机）和发电机等。我国低温和高温超导材料已在西部超导材料科技公司和北京英纳超导技术公司实现产业化。超导体的整个景象是多种多样的，并正在迅速发展。超导技术及其装备将是 21 世纪具有经济战略意义的高新技术，是国际科技发展的前沿领域。

1 电力和磁体技术对超导体的要求

大规模应用的超导体可制成圆线或型线，其中有 1 根或更多的超导细丝被包在基体中，基体的材料至少部分地由通常的金属组成，如铜或银，其目的是为了防止磁通跳跃和热失超（见图 3.7-1）。此种超导线必须具有足够的强度以承受导体制造、绕线圈、成缆、冷却时的热应力和运行时的电磁应力。它们必须有承载直流或交流工作电流的能力，工作电流常常可达几百安培，成缆后甚至可承载几千安培。特别是在临界电流密度损失以前的最小临界抗拉应力应在 100MPa 或更高的范围，在退化以前的最小拉、压和弯曲应变必须是千分之几。在～0.1～25T 范围的外加磁场下，工程（总的横截面）电流密度 J_e 在磁场中必须达到 10^4～10^5 A/cm^2。超导体的电流密度 J_c 是 J_e/f，此处 f 为总的导体截面中超导材料的填充系数。对超高磁场的（～25T）直流应用而言，工作温度趋于尽可能的低为好（例如，超流氦为 2K），但对于交流的电力应用应尽可能的高，因为在低温下发生的交流损耗要求付出强劲的制冷代价，而这个代价是在实际的低温环境中的卡诺效率的许多倍。

对不同的应用，超导最大可接受的价格范围估计从 $1～100/kAm，此处 kA 指的是工作电流值。具体地说，Nb—Ti 线典型的售价为 $1/kAm，但是限制在氦温度区中运行。在 20～77K 下运行的 HTS 预计按 $10～100/kAm 范围的某些应用是经济的。在电力设备中，铜线典型地运行在 $15～25/kAm 的范围，它为超导线设立了一个基准。总体来说，LTS 导体被用于很少或无常规替代物的应用中，而在电力技术中 HTS 材料必须与铜相竞争，因为成本的压力几乎始终是首要的。

2 低温超导体（LTS）

2.1 铌钛合金超导体

铌钛合金（临界温度 T_c = 9K）超导体是超导工业的“先导材料”，它和 Nb_3Sn 超导体一起是实际超导磁体应用的首选材料。它具有高的上临界磁场（在 4.2K 下约 11T，在 2K 下约 14T）可与铜很好地共同拉制，具有良好的加工塑性、很高的强度以及良好的超导性能。另外，很重要的一点是这种超导体的原材料及制造成本远低于其他超导材料；这种超导材料在绞制、绕制和其他应用（如编织，见图 3.7-2）方面的组装工序之前就可以进行提高超导体性能的热处理工序；它的屈伏强度与钢材接近等优点。这些优异的性能将保持 NbTi 超导合金在今后一段相当长的时间内继续广泛应用。

NbTi 多芯超导线制造工艺流程如图 3.7-3 所示。 实用

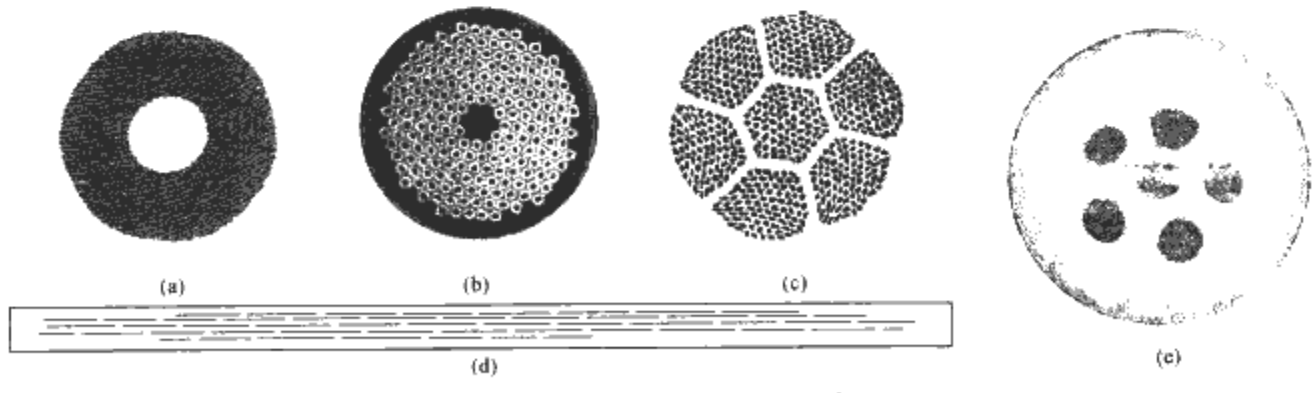


图 3.7-1 典型的多丝（芯）导体

（a）Nb47wt%Ti；导体的基体为高纯铜；（b）Nb_3Sn；导体的基体为高纯铜；（c）Bi-2212；导体的基体为银或银合金；（d）Bi-2223；导体的基体为银或银合金；（e）MgB_2 丝（芯）由 316 不锈钢包复；外护套高纯铜

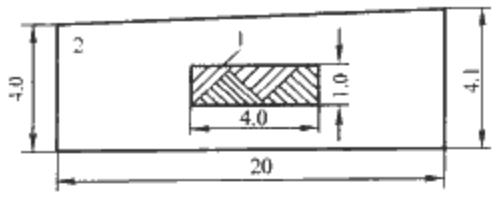


图 3.7-2 高纯铝稳定的 NbTi/Cu 超导线编织带
（铝稳定体用康仿机连续挤压，由于长度限制，分 3 段，每段铝与铝连接；编织带与铝稳定体之间弯曲后的剪切强度大于 20MPa；这种矩形导体侧弯外径为 3m）
1—1×4mm 12 锭 NbTi/Cu 超导线编织带，Al∶NbTi=28∶1；2—高纯铝（99.998%）残余电阻比 RRR>1000

化 NbTi 合金超导体的制造主要包括：①合金熔炼，最佳的合金配比含 Ti 在 46%～50%（质量百分数）。②NbTi 合金棒加工，高均匀的 NbTi 棒除成分均匀外，还有力学性能的均匀性。③包覆稳定化材料，使成百上千根 NbTi 细丝埋覆在起稳定化作用的高导电无氧铜或高纯铝中，以防止热失超或提供电流旁路。经常用剩余电阻比（RRR）来说明稳定化材料质量的高低，RRR 是指室温 293K 时的电阻率除以低温（4.2K）下电阻率的比值，通常超导磁体要求稳定材料的 RRR 比应在 30 及以上。④包套阻挡材料，Nb 是目前广泛使用的一种阻隔层材料，其目的以避免 NbTi 合金与 Cu 基体之间形成 $TiCu_4$ 等金属间化合物，防止拉线断芯而明显降低临界电流密度（J_c）。⑤多芯复合体的组合设计，组合设计在热挤压前进行，设计依据是成品超导线的参数要求，如线径、芯径、铜比等来推算包套阻隔层、NbTi 棒的尺寸和挤压次数。多芯复合线中 NbTi 芯丝间都是紧密地排列的，从芯部到外部都是按六边形的层状排列，各层的根数依次构成等差级数的关系，如 6、12、18、24、30、36、…。⑥挤压与拉伸，采用挤压使 NbTi 棒、Nb 阻隔层和 Cu 层基体之间形成结合强度很高的冶金结合。多次挤压复合可以获得芯数目很多（$>10^6$ 芯）和芯丝直径很小（$<0.1\mu m$）的多芯超导线，但多次挤压降低成品率和芯丝的均匀性。⑦时效处理及冷加工，热挤压复合棒通过冷拉减径至 25～40mm，进行热处理，其目的要使在亚稳态的 β 相 NbTi 合金中析出 α—Ti 沉淀相，作为磁通钉扎中心，从而提高超导线的性能，无论什么样的热处理制度（温度、时间和次数，一般 3 次），NbTi 合金的成分均匀性是先决条件，因为 α—Ti 沉淀相的析出速率及其形态对合金的成分非常敏感。热处理及冷加工的最终目的是在 NbTi 合金中形成大量细小、弥散分布的 α—Ti 沉淀相颗粒。⑧最终线材变形，最后一次热处理后，对线材进行最终拉伸，将芯丝直径加工至设计要求。另外，使在超导芯中形成纳米态组织，以产生强的磁通钉扎力。最后，多芯线要经过扭转，以避免芯丝间出现耦合电流，扭转节距一般在 0.3～3cm，对于应用于磁场变化速度较快的超导线，扭转节距可以取小一些。⑨绞缆，超导磁体所需的电流一般是单根导线所承载电流的若干倍，所以制作电缆是制作超导磁体的一个很重要的环节。电缆由超导复合线、绝缘材料、附加基体稳定材料、支撑骨架、冷媒通道和外层套管等组成，电缆制作技术与常规电缆工业的基本接近。⑩引入人工钉扎中心，在 NbTi 超导线中引入人工钉扎中心（APC），而不通过热处理产生磁通钉扎结构。钉扎材料可以选用非 NbTi 合金材料，可能具有比 α—Ti 沉淀相更强的磁通钉扎力；钉扎中心可以人为地组合或排列成特殊的几何形状，以与磁通点阵很好匹配，产生更好的钉扎效果。钉扎中心材料可以改善和提高最终线材的其他超导性能如 Tc 温度，在不需较大改变复合体设计的情况下，钉扎中心的体积百分数可远大于 20%。正是由于这些潜在的优点，APC 超导线得到了广泛的关注和研究，并已取得很大的进展。

随着对 NbTi 超导线的深入研究和制造工艺的不断改进，20 世纪 70 年代初，NbTi 超导线的临界电流密度（J_c）只有 1800A/mm²（5T，4.2K），到了 80 年代 J_c 已达到了大于 3700A/mm²（5T，4.2K），80 年代以后用 APC 法制造的 NbTi 超导线或采用非常长的热处理时间，使 NbTi 线的 J_c 值已超过了 4000A/mm²（5T，4.2K）。

1970 年西北有色金属研究院研制生产了 1800kg NbTi/Cu 单芯复合线，线材平均长度 5000m，最长达 200 00m 以上。长线 J_c 值最高达 1.0×10^3 A/mm²（7.21T，4.2K）；在 80 年代初我国 NbTi 超导材料研制和生产已具有一定生产能力。NbTi 线单根长度已可达 200 00m，NbTi/Cu 多芯复合线短样 J_c 值最高达 3.5×10^3 A/mm²（5T，4.2K）；1993 年 Nb46.5Ti 合金超导线的 J_c 值达 3.5×10^3 A/mm²（5T，4.2K）和 1.74×10^3 A/mm²（8T，4.2K）的国际前沿水平。我国 NbTi 超导线的性能已达到国外生产的 NbTi 超导线的水平，价格也低于国外产品；1995 年，西北有色金属研究院研制出芯径 1μm、线径 0.17mm，长达近千米的 NbTi/CuNi-Cu 极细芯复合超导线。在此基础上又采用增加铌阻隔等措施，进而研制出芯径达 0.46μm、芯数为 244 62、

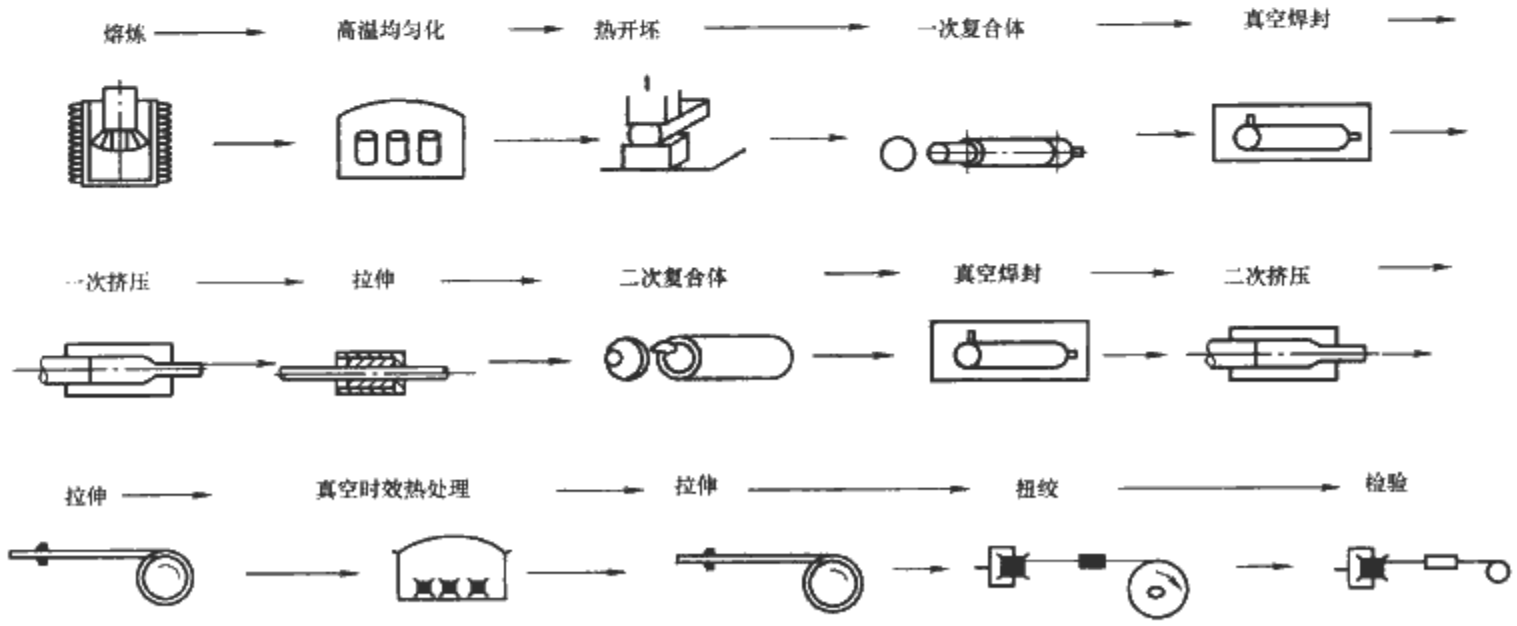


图 3.7-3 NbTi 多芯超导线制造工艺流程（西北有色金属研究院）

J_c 值达 1.9×10^3 A/mm^2（5T，4.2K）的交流（50～60Hz）用 NbTi 三元合金线。

目前 NbTi 超导线主要用于磁共振成像（MRI）、核磁共振（NMR）、实验室仪器、粒子加速器、电力、扫雷、矿石磁分离、磁悬浮列车、超导储能（SMES）等场合。

2.2 铌三锡超导体

在 1961 年，Nb_3Sn（$T_c=18$K）的原型线就显示了它在高磁场超导电性场合应用的可能性（见图 3.7-4）；它的 H_{c2} 在 2K 下达到约 30T，明显地超过了 NbTi，从而使它成为较高磁场系统的首选物。但最初的进展就受到了限制，这首先是因为 Nb_3Sn 是一种脆性的金属间化合物，不像 NbTi 合金那样易于加工。然而，在 20 世纪 70 年代初，用青铜法就将实用的 Nb_3Sn 多根（芯）细丝超导体开发出来了，从而在许多实验室和高场 NMR 磁体获得应用，至今仍处在开发应用之中。因为进一步的应用磁场已超过了 NbTi 的实用工作磁场（约在 4.2K 下，9T 和在 1.8K 下，12T），所以对 Nb_3Sn 有了深厚的兴趣，等离子体约束的应用亦促进了这方面的发展。

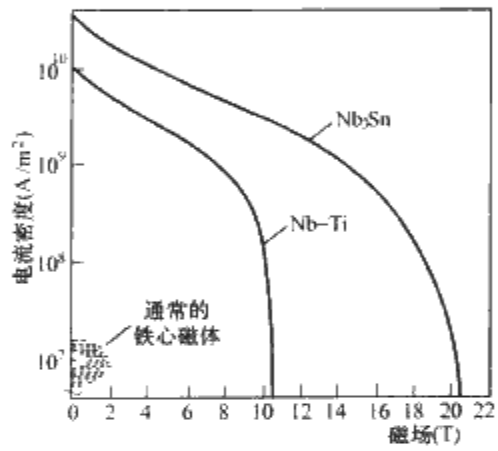


图 3.7-4 铜导体和 NbTi、Nb_3Sn 超导体电流密度与磁场关系的比较

有几种加工工艺可用于制造多根细丝 Nb_3Sn 超导线，这些加工工艺允许加工易变形的坯料，并一直拉到最终的线材尺寸；接着，通过组元的反应形成 Nb_3Sn 金属间化合物。所谓青铜法就是将在 Cu-Sn 合金基体中的 Nb 杆一起拉制，Cu-Sn 合金实际上是制成富 Sn 的，但仍然保持良好的韧性（约 15wt%Sn）。然而，大量剩余的铜在反应以后被留下了，使超导层的面积成为整个导体的一小部分。为了获得较高 Nb_3Sn 的体积，从而获得较高的整体 J_c 值，所以内 Sn 法被提出来了。这种多根细丝复合体在铜基体中含有 Nb 丝，而 Sn 被引入作为一种单独的组元，通常作为一个芯加到 Nb-Cu 多根细丝复合体中。这两个方法和新的粉末填管法（PIT 法）一起如图 3.7-5 所示。

最近，对 Nb_3Sn 起推动作用的主要是两方面的技术，即用于高能物理（HEP）加速器磁体和磁核聚变（MFE）磁体。第三个虽然尚需进行公开讨论，它将用于 800 和 900MHz 级光谱仪（频仪）用的非常高磁场的 NMR 磁体。在 20 世纪 90 年代初，HEP 和 MFE 就开始计划开发高场（>12T）应用的超导体和磁体。HEP 工作项目的中心点是偶极子和四极子磁体（图 3.7-6），而核聚变计划的中心点是用于国际托克马克实验反应堆（ITER）的螺线管和环形的磁场线圈。两个计划选择 Nb_3Sn 作为最有希望的高场用导体，从而在工业中开始了该导体的开发计划。在 20 世纪 90 年代，ITER 计划是 Nb_3Sn 的最初客户。这个计划有助于建立 Nb_3Sn 大规模的生产能力，并且也激励了青铜法、内锡法和粉末填管法（PIT）多根细丝线制造技术的进一步发展。

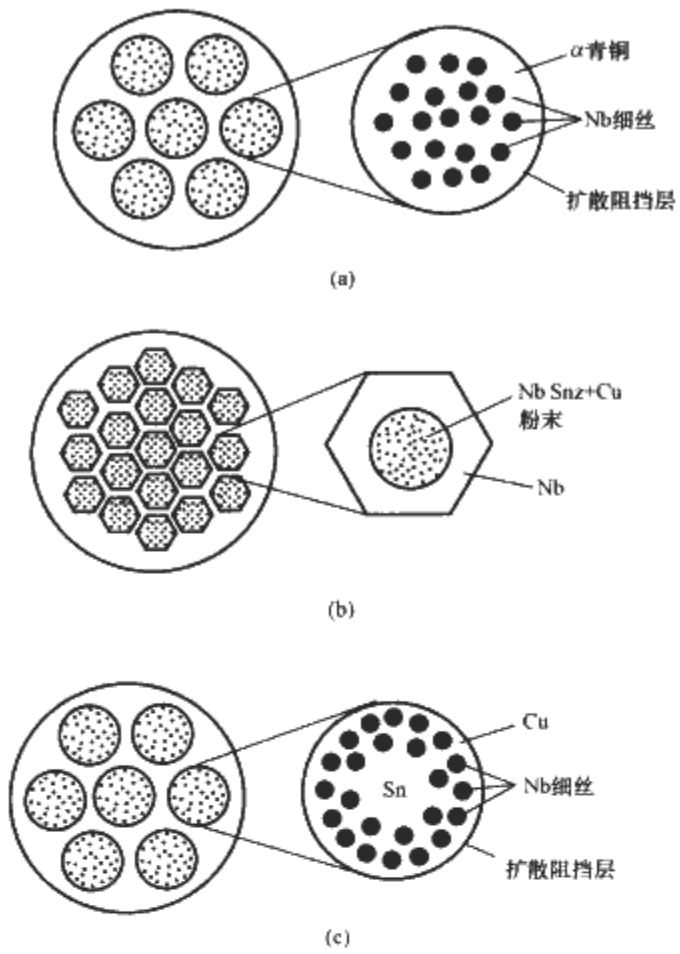


图 3.7-5 用青铜法、粉末填管（PIT）法和内锡法制造的 Nb_3Sn 超导线

（a）青铜法；（b）粉末填管法；（c）内锡法（显示杆加工）

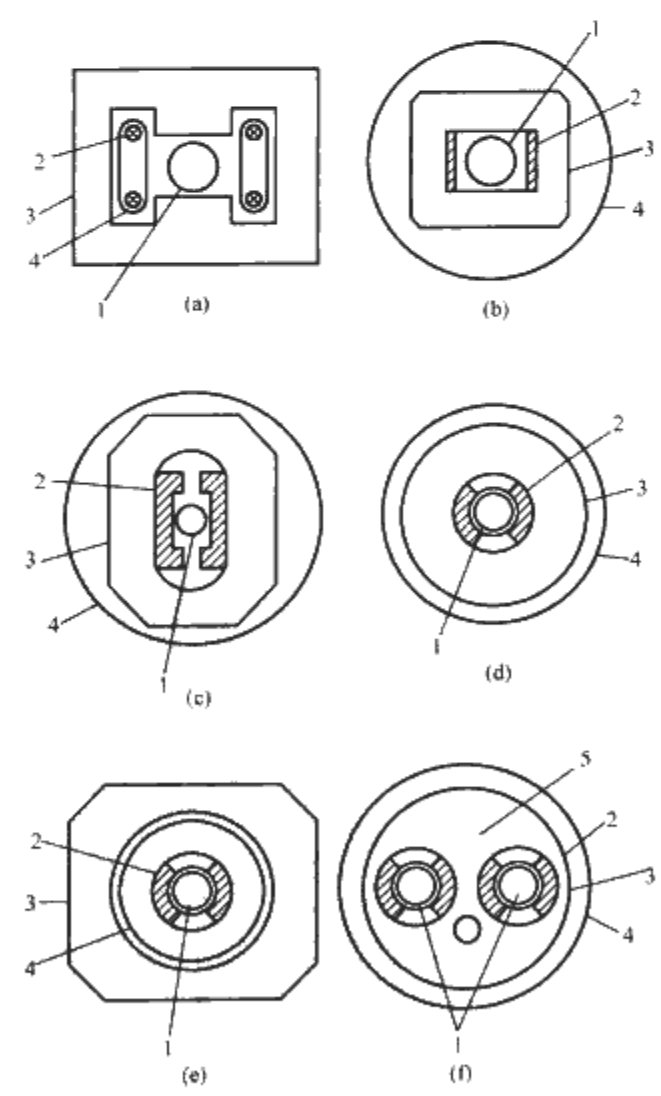


图 3.7-6 典型的超导偶极子设计磁体的组成

1—射线管；2—超导体；3—铁架；4—低温恒温器；5—校正铁饱和的孔

作为美国高能物理实验室加速器偶极子设计项目的结果，从而可清楚地看到：具有较高磁场和经济上有利的磁体需要较高的电流密度，由此降低制造价格。因而，在 1999 年开始了一个新的 Nb_3Sn 导体的开发计划，计划的目的在于为下一代高能物理对撞机和为费米国家加速器实验室（Batavia）、IL 及 Consel European Pour la Recherche Nucleaire（CERN）现有对撞机的升级提供经济、高性能的超导体。导体的目标标准如表 3.7-1 所示。要强调的是改进线的非铜部分的临界电流密度 J_c 是最重要的，接着是减小有效的细丝直径 d_{eff}，然后获得较低的价格。

计划的首要目标是获得非铜（noncopper）J_c（12T）从 2000 增加到 3000A/mm²，这已在 2002 年达到了。这个目标的完成并没有增加每千克的价格，所以价格性能比有了明显的降低。这种新的线不仅有极好的 J_c 值，而且能生产出很好的长度。这种线用于一个新的偶极子磁体，这个磁体最近达到了几乎 16T 的偶极子场的新记录。

表 3.7-1 HEP 导体目标性技术指标

J_c（非一铜，12T）	3000A/mm²（这已在 2002 年达到了）
J_c（12T）	>1000A/mm²
有效细丝尺寸	<40μm
加工的单元规格	规模制造的重量>100kg；线的平均件长>100 00m
直径	0.3～1.0mm
线的价格	<$1.50/kAm（12T，4.2K）
短的热处理时间	最大 400h；对绕磁体和反应磁体，目标 50h

磁体的设计内容包括在最高的磁场区导体上保持相对低的横向应力的开发，并与 Nb_3Sn J_c 值的改进结合在一起，这就意味着 Nb_3Sn 在偶极子磁体上应用（至少达到 16T 或许还可达到 18 或 20T）具有技术性能和经济方面的优势。详细的磁体设计工作项目正在几个 HEP 实验室进行之中，以确定如何进一步推动 Nb_3Sn 的发展和应用于此种场合最好的导体设计的选择。

目前 Nb_3Sn 最大的商业应用领域是 NMR 磁体。这个应用正在迅速增长，并正稳定地转向较高的磁场。由于 Nb_3Sn 的 J_c 的最新改进已扩大了它的使用磁场的范围，至少在 1.8K 下达到 21T，这使得 900MHz 系统的持久状态成为可能。在实际的 NMR 磁体中，为了达到这些高场，重要的挑战现已被克服。因为这是一个竞争非常剧烈的商业范畴，所以磁体结构的详情通常是不会发表的。

最近在 10～16T 下用于 HEP 的 Nb_3Sn 导体性能的提高，亦有利于非常高磁场的应用，这是因为上临界磁场得到了提高。现在可广泛地预计更新的 Nb_3Sn 导体将允许 1GHz 的 NMR 磁体由 Nb-Ti 和 Nb_3Sn 来制造。这样将要求磁体能在大约 23.8T 的磁场下持久工作，此时，在该工作温度下材料的上临界磁场约为 28～29T，这是一个真正的挑战，但是可以达到的目的。

我国在 20 世纪 70 年代初，长沙矿冶研究所等用气相沉积和扩散法研制出 Nb_3Sn 带材，其短样 J_c 达 $(2.5\sim2.7)\times10^3$ A/mm²（4.2K，4.0T），接近当时的国际水平。已用其绕制磁场达 10～11T 的超导磁体。1972 年宝鸡稀有金属加工研究所开始研究青铜法制备 Nb_3Sn 的工艺，在国内首先采用一千多芯的线材绕制出 10mm 口径、中心磁场达 9T（4.2K）的 Nb_3Sn 超导磁体。西北有色金属研究院在采用青铜法研制的多芯 Nb_3Sn 复合线方面作了大量工作。其研制的多芯 Nb_3Sn 线材 J_c 达到 9×10^2 A/mm²（10T，4.2K）和 5.8×10^2 A/mm²（12T，4.2K）。此外，该院还开展添加钛的 Nb_3Sn 超导扁带和绞缆带的研究，研制出 J_c 达 3.7×10^2 A/mm²（20T，4.2K）的 $(NbTi)_3Sn$ 多芯复合带材。与此同时，中国科学院上海冶金研究所采用掺钛的铌管法研制了多种尺寸的 Nb_3Sn 多芯线，并用此绕制多个不同孔径的 Nb_3Sn 线圈，用于 11～14T NbTi-Nb_3Sn 超导磁体中。

2.3 二硼化镁（MgB_2）超导体

在 2001 年初日本的 Akimitsu 研究组发现了人工合成的 MgB_2 金属间化合物具有超导电性，它的临界温度高达 39K，是 Nb_3Sn 的 2 倍、NbTi 的 4 倍。MgB_2 的结构属六方晶系，在两个硼原子层之间有一个镁原子层，其超导电性源于硼原子层。MgB_2 是一种“常规的”S—波超导体，但具有不常规的特性，它含有两个非常弱的耦合超导隙，这两个一隙特性对它的高场性能潜力是非常重要的。

尽管事实上存在交错的 Mg、B 层结构会致使产生电子各向异性现象，早期关键性的发现在 MgB_2 中随机取向的晶粒边界不会阻碍电流流动，因此，MgB_2 中超导电流密度较高，晶界对超导电流是“透明的”，即超导电流不受晶界连通性的限制。然而对 MgB_2 超导体，超导电流密度随外磁场的增加而迅速减小，这表明随着磁场的增加，磁通钉扎能力变弱，因此，从实用观点看，提高 MgB_2 的磁通钉扎能力至关重要。此外，MgB_2 还存在下列两个不足之处：①低温下低的上临界磁场 H_{c2}，至今报导在 4.2K 下 H_{c2} 最高为 15T 左右，介于 Nb_3Sn 和 NbTi 之间；②低的不可逆性磁场，液氦下仅有 7T，明显低于 NbTi 10T 和 Nb_3Sn 的 20T。

对 MgB_2 的制备和成材，制备 MgB_2 单晶是十分困难的，但多晶 MgB_2 非常容易获得。MgB_2 超导体与 Nb_3Sn 很相似十分容易加工。MgB_2 可用 PIT 法制造，并且许多研究组都已用两种办法—预反应（前置）MgB_2 粉末以及 Mg 和 B 粉末的混合物，必须在线内部（原位）反应成 MgB_2—做出了样线。MgB_2 线已很快地应用于 ASTRA—2 卫星中的低热导率电流引线。然而根据许多样品（包括线）的电阻率分析可清楚地看出：大多数的 MgB_2 实际上还远远没有充分的烧结或电连接。由于 B 的气孔率和润湿，也许还有富氧相妨碍了许多晶粒边界，并且气孔仍存在于线中的某些地方。然而，即使这样在较低的温度和磁场下 J_c 还超过了 10^3 A/mm²。据资料报导，在充分连接的薄膜中 J_c 值已高达 10^5 A/mm²。因此，可清楚地看出：至少在低于约 25K 的温度范围内，即不是电流密度也不是上临界磁场阻碍了 MgB_2 的应用。从而，MgB_2 线就成了在低温（<25K）应用中使用的 LTS 线和 BSCCO 线的可信竞争者。还有另外的一种性质是：H_{c2} 转变相当急剧，与 HTS 材料相比，更类似于低 T_c 材料。因此，使用 MgB_2 制造有潜力的 NMR（25K 运行的 1.5T 磁体）或 MRI 磁体导体，使高 n 值和均衡持久模式的磁体出现是有可能的。MgB_2 超导体的制造成本，据已经做出的大于 100m 的长线样计算的价格可保持在低的价位，BSCCO 超导体要达到 10USD/kAm 的性能价格还很困难，但 MgB_2 是可能的，似乎很可能与 Nb—基 LTS 超导体相竞争，而与 BSCCO—基的或 YBCO—基的第一代和第二代 HTS 导体相竞争将取决于在扩大温度范围（在这个范围里，有几个 T 的磁体下高的电流密度能够维持）方面的发展。

总之，MgB_2 以新的姿态进入超导线舞台引起了人们很大的兴趣。MgB_2 的碳掺杂对提高 H_{c2} 特别有价值。提高 H_{c2} 和磁通钉扎强度的一个有效方法可通过添加 SiC 纳米微粒来实现。因为 MgB_2 的制造可使用通常的金属加工方法来实现，所以试验工作的障碍是很少的。

展望未来，由于 MgB_2 的 T_c 高、不存在于高温超导体中难于克服的弱连接问题、不需要高度织构和容易加工成材，因此无论对基础研究还是应用研究都具有重要的意义，受到了国际学术界的广泛重视，为磁体和电子应用提供了新一类低成本高性能超导材料的可能性。MgB_2 指望代替高温超导材料的一些应用。虽然现在载流能力还远低于 HTS 材料，但将来可能会很高，多数科学家相信随着研究的深入 I_c 会不断提高。面对这种新的超导体，材料制造者对 MgB_2 的商品化，抱谨慎乐观的态度。

3 高温超导体（HTS）

3.1 BSCCO—2223 超导体

目前，高温超导材料主要有两类：一类以钇钡铜氧（YBa_2Cu_3Ox）为代表（$T_c=92K$），或称 YBCO 或 Y—123，其中 Y 能被多种稀土元素替代。另一类为铋锶钙氧铜，以 $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2Ox$（Bi—2212）和（Bi，pb）$_2$ $Sr_2Ca_2Cu_3Ox$（Bi—2223）为代表。Bi—2212 的 T_c 为 80～90K 左右，而 Bi—2223 为 110K 左右。由于材料性能不同，Y—123 常用于制备高性能超导薄膜，用来制作弱磁场、远红外、微波探头等器件，在弱电的电子方面应用，现在正在开发的第二代超导体，也采用 Y—123 材料制作镀膜超导导体；BSCCO 易被制成 Bi 系高温超线（带）材，用于制造电力电缆、各种电机、磁体、储能、限流器和变压器等强电方面应用。

铋系氧化物超导体有下列几个主要的特性：

（1）晶体结构。铋系超导体惟一的一个理想分子式为：$(Bi(O)_2(SrO)_2\ Ca_{n-1}(CuO_2)n$，当 $n=1$，2，3 时可分别得到 $Bi_2Sr_2CuO_6$，$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ 和 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$，并被分别简写为 Bi-2201，Bi-2212 和 Bi—2223。

（2）多相性。Bi—Sr—Ca—Cu—O 系统与 YBCO 不同，由于多相共存，而且相间有相当大的溶解度，极难得到单相材料。要获得纯度高于 90%的 Bi—2223 相，要用 Pb 代替几乎 20%～30%的 Bi。从工业规模应用的角度来看，在已知的 HTS 超导体中 Bi，Pb(2223)可以看成是一个特例。Bi，Pb(2223)—Ag 带材的重要优点是可在 4.2～77K 的宽温区使用，在 77K 下能够承受零点几特的磁场，明显优于 T_c 为 92K 的 Bi—2223 带材。

（3）各向异性。目前已发现的 HTS 材料都属氧化物陶瓷材料（不易加工成材），在 Bi—2212 及 Bi—2223 的加工过程中，发现这些 BSCCO 相有明显的晶粒生长各向异性，从而导致形成具有大宽厚比的片状晶粒，在平行 C 轴方向上的尺度极短只有几个微米，但在 a 和 b 方向上生长几十微米甚至达 100～200μm，这个特点有助于在 Bi—2212 及 Bi—2223 的扁平带中形成织构。因此人们尝试了不同的生产工艺，来开发织构化并具有高 J_c 的带材。

（4）在两个相邻晶粒边界处不存明显的弱连接。在测量 Bi—2212—Ag 线中的传输临界电流密度时，没有发现明显的弱连接。

（5）包覆材料的透氧性。高温超导体的包覆材料不仅要有好的可加工性、足够高机械强度、不能对高温超导电性发生破坏性反应，而且在退火处理过程中要允许氧透过，但自己又不被氧化。因此，在 BSCCO 导体生产中采用银。

铋系 HTS 材料在强电中应用，通常要加工成超导体和正常金属构成的多芯复合带或线，其工艺过程如图 3.7-7 所示。这个过程包括制粉、加压制棒、装银管和通过多道工序的拉制、装管、压轧、热处理，最后得到多芯复合线（带）材等几个主要阶段，这种制带方法有三个重要的内容：①要使用银或银合金，它对超导体是惰性的，在高温下允许氧快速扩散；②用轧制工艺把线轧成带状是必须的，为的是需要将粉末织构化，高度织构化是在最终的制品中获得高 J_c 的关键；③BSCCO 这个方法的成功，看来与容易沿着弱关联的双—Bi，Pb—氧化物层滑动有关；当轧制变形时，该特性促进了织构化。这容易滑动的平面使晶团的形成成为可能，或亦能使许多高方位的晶粒（显著地随机取向转动的）的堆积成为可能（相对于互相围绕一个共同的垂直于 CuO 平面的 C 轴）。该结构被认为易于电流流动。

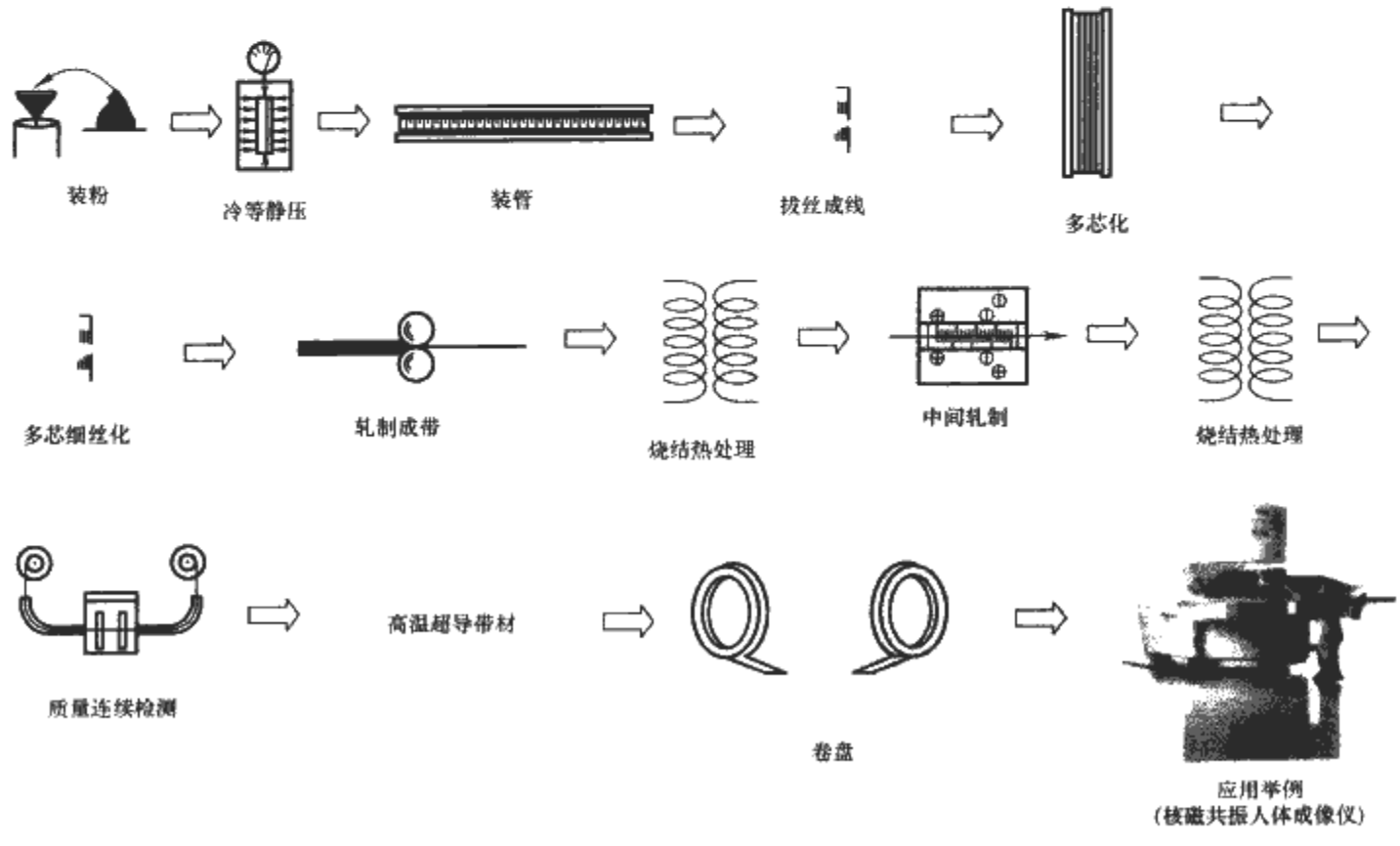


图 3.7-7 北京英纳超导技术有限公司高温超导线（带）材的生产过程（PIT 法）

做成带状的第一代高温超导线，其典型的尺寸为 0.2×4.0mm 左右（0.25×4.0mm 约为 1mm²），由 55 根或以上的带状细丝所组成，每根细丝厚 10μm、宽可达 200μm，它们包在银或银合金基体中。该细丝由 BSCCO 的晶粒组成，其长度可达 20μm，它们常常排列共用一个共同 C 轴的晶团。对某些应用，为了提高机械性能，常在这种线的任何一侧覆上不锈钢带。

第一代高超导带（BSCCO—2223）已经产业化。根据不同用途的需要，美国超导公司已推出了诸如电力电缆、旋转电机、线圈、磁体和引流线等用的 BSCCO—2223 带材的产品（见表 3.7-2）。我国北京英纳超导技术有限公司也推出了同类的产品，其产品规范如表 3.7-3 所示。我国西部超导材料科技有限公司亦分别于 1998 年和 2002 年研制了 Bi—2223/Ag 多芯复合长带，其 J_c 值达到了 1.5×10^2 /mm²（0T，77K）和临界电流达 110A，工程临界电流密度接近 100A/mm²（自场，77K），并研制成功中心磁场达 2T（4.2K）的 Bi 系超导磁体。

表 3.7-2 美国超导公司 BSCCO—2223 带材的产品规范

性能项目	性能指标范围	备 注
平均厚度(mm)	0.19～0.32	
最小宽度(mm)	3.6～4.7	
最大宽度(mm)	4.3～5.0	
最小弯曲半径(室温)(mm)	25	I_c 保持大于 95%
最大额定拉应力(室温)(MPa)	65～200	
最大额定线张力(室温)(kg)	4～26	
最大额定拉应力(77K)(MPa)	65～300	1. I_c 保持大于 95% 2. 77K，自场，1μV/cm
最大额定拉应变(77K)(%)	0.10～0.35	最大额定压应变(77K)，0.15%
密封性	—	30atm LN_2，16h
用户选择内容		
最小电流 I_c(A)	平均工程电流密度(J_e)(A/mm²)	
115	79～127	
125	86～139	
135	93～150	
145	100～161	
每件连续长度	100～400m，按需可供更长	
绝缘选择	聚四氟乙烯或聚酰亚胺	

表 3.7-3 北京英纳超导技术有限公司 BSCCO—2223 带材的产品规范

性能项目	性能指标
材料	Bi-2223
结构	多芯细丝
厚度	(0.23±0.01) mm（其他尺寸亦可供应）
宽度	(4.2±0.1) mm（其他尺寸亦可供应）
长度	200～1000m
临界温度	110K
工程临界电流密度 J_e	90.0A/mm²（77K，自场）
临界电流 I_c	90A（77K，自场）
最大拉应力	120MPa（I_c 退化 5%）
最小弯曲半径	25mm（I_c 退化 5%）
绝缘（选择）	300V 击穿电压（10μm 绝缘层）

注 1. 如在带材表面覆不锈钢带等方法，带材强度可达到 200MPa 以上。

2. 到 2010 年 Bi 系高温超导带材的价格可望降至 $50/kAm。

3. 据需要带材表面可进行加强、绝缘和镀锡处理，以提高强度、满足电性能、方便焊接和防止使用过程中产生气泡。

第一代 HTS 超导线通常的售价在 $150～200/kAm，但随着制造效率的提高，进一步增加 I_c 的基本值，预计价格性能比会降到 $50/kAm。通过对 BSCCO—2223 材料及其相转变的深入了解、掌握与电流流向密切相关的知识和如何限制微观上的缺陷，从而使 I_c 获得更大的进步看来是有可能的。近年来，在减轻制约电流的两个重要机制的影响方面取得了新的进展：①是有残留的孔隙（多孔性）影响了致密化，这种情况是在 2212 和 2223 相反应时发生的，另外，还有开裂，开裂是在中间轧制阶段发生的，然而为了除去一些孔隙，这种中间轧制又是必要的。②是由于没有反应的 2212 相条痕缺陷，这种缺陷的发生或者作为共生物存在于 2223 相里面，或者作为个体晶粒存在于约由 10 个共享 C 轴的 2223 晶粒构成的晶团中。通过在达到 150×10^5 Pa 的流体静压力的处理，可使孔隙和开裂明显地减少，在 0.1T，77K 的测定基准点下，新的 J_c 值可达 304A/mm²。对应的磁场值（在 77K 下，线的尺寸为 4.2×0.21mm）已超过 200A。类似地，改善热处理也可减少残留的 2212 相的总量。总之，这些影响 J_c 的因素，部分地已在第三代高温超导体中体验出来。

随着第一代 BSCCO—2223HTS 线明显的性能改善、价格降低和大规模生产线的成功建立，事实表明，它在符合应用要求方面是成功的，并且正在广泛地用于商用的样机，它将是首次 HTS 商业应用的基础，预计很大程度上将应用在电工装备场合和磁体方面，它的大规模应用将在电力电缆上首先突破，而此种磁体在高于 30K 的温度下工作仍是更为可取的。今后，这种线的应用取决于价格一性能比降低多少，也取决于来自第三代 HTS 超导体的挑战和第二代 YBCO 镀膜超导体的成功开发。

迄今，世界上最长的 500m HTS 电力电缆（单芯电缆）由日本古河公司于 2003 年在连续生产线上试制完成、2004 电缆系统安装（包括电缆、终端和制冷等系统）完成，约经 1 年时间在试验场完成验证试验，其目的在于示范和验证下列性能：①液氮的流动性能—如压力损失、在冷却管中的流体振动（在实际的长度下）。②冷却运行特性、电绝缘性能、在 HTS 超导体中电流流动性能及其他性能。③电缆终端。

这根电缆的结构和规范如图 3.7-8 和表 3.7-4 所示。

我国用由北京英纳超导技术有限公司生产的 BSCCO—2223 超导带的 30m，35kV/2kA 高温超导电缆系统示范工程于 2004 年在云南昆明市普吉电站并网试运行。

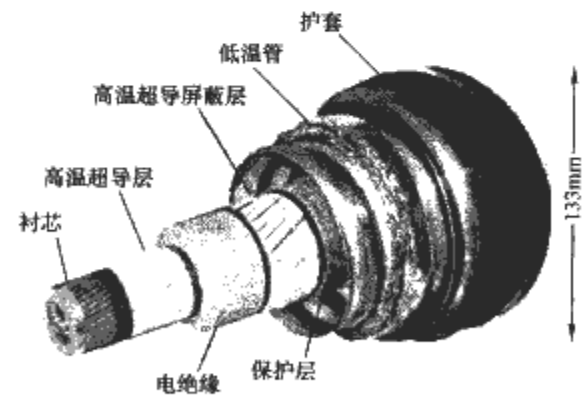


图 3.7-8 500m HTS 电力电缆

表 3.7-4 500m HTS 电力电缆规范

电压(kV)	77	导体外径(mm)	31
电流(kA)	1	电绝缘厚度(mm)	8
热侵入(W/m)	1	芯外径(mm)	48
HTS 带(4×0.2mm)	Bi-2223 I_c=70A	电缆外径(mm)	132

3.2　BSCCO—2212 超导体

HTS BSCCO—2212 的 T_c 约为 90K，在液氮温度载流能力很好，BSCCO—2212 相比 BSCCO—2223 相更易形成，且稳定性好，但对高温应用而言，它已被 BSCCO—2223 超越了。BSCCO—2223 具有较高的 T_c 和不可逆磁场。然而，在低温下(约在 20K 以下)BSCCO—2212 有着较高的 J_c 和高的磁场。例如，日本昭和线缆有限公司在长的浸镀带上使用预退火中间轧制(PAIR)法使 J_c 值达到了 7100A/mm^2(在自场下)和 3500A/mm^2(在 10T 平行于带面的磁场下)。这个已经能够应用于 NMR 的高场镶嵌件中以及作其他的应用。目前 BSCCO—2212 保持着超导磁体产生高场的纪录。2007 年 2 月 11 日在《自然·物理》杂志上发表了经美国西北大学物理学家证实：Bi—2212 在 12K 下工作时(此温度可用液氮冷却来实现)会出现高磁场所需的稳定状态，因此是一种极好的磁场材料，如果能将其加工成导线，那么有望制成世界上最强的磁体，磁场强度可达 30 特斯拉。

同时，世界上亦已制成了 BSCCO—2212 银基体圆线[图 3.7-1(c)]，它具有极好的工程临界电流密度 J_e，在 20T，4.2K 下，J_e 已超过 500A/mm^2。这种线能直接用于代替在加速器磁体应用中的卢瑟福式电缆的 LTS 线，并且第一个系列的原型线圈已经做出来了。为了进一步的应用，有两个问题必须解决，第一个问题，价格和性能比必须从目前的约 $50/kAm 降到 $10/kAm。第二个问题，为在工业环境中能达到精确的热处理控制必须开发实用的方法。为了达到最佳的性能，需要采用"部分熔融法"以产生织构和克服弱连接，并且温度必须控制到约 870℃ 的几度之内。目前，世界上昭和、Nexans 等公司正在制造 BSCCO—2212 线。所有公司都展示出极好的 J_c 值。昭和和"Nexans"都已做出 1600m 长的线而不断，并且能够控制热处理而获得均匀的性能。

3.3　DI—BSCCO—2223（CT—OP—BSCCO—2223）超导体

DI—BSCCO—2223 超导带(DI 即 Drastically Innovative)亦称 CT—OP—BSCCO—2223 超导带(CT—OP 即 Controlled-overpressure)由日本"住友工电"开发，住友电工把这种带称作第三代高温超导线。这种高温超导带，采用的也是铋系超导材料，但采用受控过压烧结法工艺，其工艺过程如图 3.7-9 示。用这种方法制造的 Bi-2223 线，Bi2223 相均一性、连通性、临界电流密度和机械性能都获得提高。临界电流密度比常规烧结法制造的高 30%，其原因主要在于：相对质量密度几乎达 100%；Bi2223 相变得均一；错误排列角降低；由于微孔和缺陷的减少连通性改善。受控过压烧结 Bi-2223 超导线的理论基础是：在线中流动的超导电流必须在板状晶粒中流动，而这种板状晶粒的晶体取向是平行于 ab 平面的，并且此种晶粒之间也是平行的。当 Bi2223 相的均一性被实现和在板状晶粒(这种板状晶粒是沿着带表面取向的)之间获得好的连通性时，那么超导电流将容易流动，于是 Bi2223 超导线就能获得高的性能。

如图 3.7-9 所示，反复地进行轧制和烧结是重要的。由第一次轧制成形的带状线烧结(第一次烧结)后 Bi2223 晶粒生长。在第一次烧结以后，用两辊轧机轧制，使得 Bi2223 晶粒都平行于带表面排列成行，并且在细丝中变得密集。于是在第二次烧结中，Bi2223 晶粒被连接，图 3.7-10 是在理想状态下的超导电流流动，为了实现这个理论，增加超导电流的数值，所以要在密集的状态下[图 3.7-10(a)]烧结晶粒。

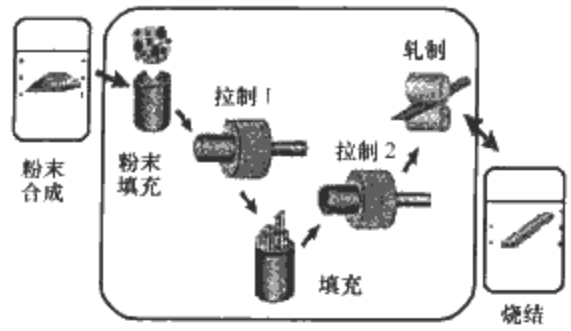


图 3.7-9　Bi2223 超导线基本的制造方法
[粉末填管法(PIT)]

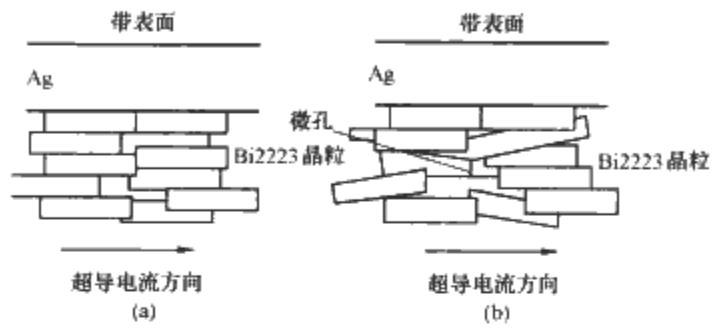


图 3.7-10　在 Bi2223 晶粒之间的连通性
(a)密集状态；(b)不密集状态

然而，在轧制操作中在细丝内形成的裂开在烧结操作时是不能完全地恢复的。这个被认为是 Bi2223 低性能的原因之一。在烧结过程中 Bi2223 晶粒生长，但这种按轧制加工表面的生长只要稍有错误排列，就会招致在细丝中晶粒之间形成细孔。这就意味着当烧结时由轧制形成的密集晶粒已经变成不密集的晶粒了，由此导致细丝质量密度降低的问题产生了。在图 3.7-10(b)所表示的状态下，由于在连接的晶粒之间流动的超导电流的数量降低了，所以可以认为质量密度的降低是 Bi2223 线性能低的原因之一。在第二次烧结以后 Bi2223 线具有的特征是：①Bi2223 相形成不充分；②按带面 Bi2223 晶粒错误排列；③微孔形成；④由轧制形成的裂开没有完全恢复。这可以看出直接影响了 Bi2223 的均一性、晶粒排列和晶粒连通性，所以质量密度的降低是与 Bi2223 线性能降低密切相连的。

为了制造高性能的 Bi2223 线，在轧制和烧结工艺上必须进行第二次轧制和第二次烧结。在第二次轧制进行以后，Bi2223 晶粒变得密集[图 3.7-10(a)]，并且当烧结时要使裂开完全地恢复。从而防止在第二次烧结进行以后细丝质量密度的降低。住友电工致力于第二次烧结工艺的研究，开发了受控过压烧结法，解决了由轧制过程形成的裂开问题和由此引起的当烧结时质量密度的降低问题。受控过压是一种方法，该方法是对 Bi2223 线施加均衡的气体压力(氧和惰性气体的混合物)总压力 30MPa，氧分压 7.21kPa，温度 900℃，在受控高压容器中进行，容器的温度、压力和氧分压均与 Bi2223 的性能有关，所以这些因素都能独立地控制，并可烧结公里级长的 Bi2223 线。

由于采用受控过压烧结法，使 BSCCO 部分的密度提高，因此线的性能和生产效率明显提高(见表 3.7-5)。

DI—BSCCO—2223 高温超导带已商品化生产，该产品的规范和特性如表 3.7-6 所示。

表 3.7-5　受控过压烧结和常规烧结制线性能与效果比较

项　目	受控过压烧结	常规烧结	效　果
密度(%)	约 100 (有比较小而少的不同的相)	约 85 (有大而许多不同的相和孔隙)	约提高 15

续表

项 目	受控过压烧结	常规烧结	效 果
临界电流 I_c(A)	130～150	100～110	约提高 30%
抗拉强度(在室温下)(MPa)	>150	<100	>1.5 倍
单位长度(m)	>1500m	<500m	3 倍
生产效率(%)	90 及以上	约 20	—
密封性(对液氮抗气泡性能)	在不增密封措施下，在 1MPa 液氮中历时 24h 后没有出现"隆起"现象	需另加密封措施	—

表 3.7-6 DI—BSCCO—2223 高温超导带的规范和特性(住友电工标准)

项 目	高 I_c 型 (CT—OP15—110)	高强度型 (CT—OP22—80)
宽度(mm)	4.3±0.2	
厚度(mm)	0.22±0.02	
长度(m)	～1500	
银比	1.5	2.2
I_c(77K，自场)(A)	110A	80A
J_e①(77K，自场)(kA/cm²)	11	8
临界抗拉强度②(室温)(MPa)	100	170
临界抗拉强度②(77K)(MPa)	160	230
临界弯曲直径②(室温)(m)	70	50
护套	高强度银合金	

① J_e：工程临界电流密度＝I_c/整个横截面积(宽×厚)。

② I_c：保持 95%。

DI—BSCCO—2223 高温超导带已在下列两项典型的工程中应用：

(1)"KEPRI"工程。住友电工与"KEPRI"(Korean Electric Power Research Institute)合作以工程承包的型式签订了建设一个完整的 100m 高温超导电缆系统的合同，该系统具有 22.9kV，1250A 的容量(约相当通常韩国配电线路的 5 倍)。整个 100m 电缆属三芯在一根低温管中的型式(3-In-one HTS cryostat cable)，除电缆外住友电工亦提供液氮系统和电缆终端。该电缆系统安装在 Gochang KEPRI 试验场。整个工程预计耗资 240 万美元，2004～2005 年设计、制造，2005～2006 年安装运行。

(2)"Albany"工程。这是一个国际合作的示范性工程，住友电工负责 3-in-one HTS cryostat cable 的制造、安装、建设和连接电缆到实现的线路上，并在现实的负荷下运行这个 HTS 电缆线路。电缆长 350m(其中 320m 为由住友电工用 DI—BSCCO—2223 高温超带制造的电缆，另外 30m 为由第二代镀膜高温超导带制造，预计在 2006 年替换)，34.5kV，800A 三芯冷绝缘结构。电缆安装在美国纽约 Albany 的两个变电站之间。该电缆系统的规范如表 3.7-7 所示。整个工程计划耗资 2600 万美元，2003～2005 年设计、制造和安装，2006 年运行，其中于 2004～2005 年制造用 YBCO 镀膜带的电缆，并于 2006 年实现替换。到时，这个 HTS 电缆系统将是世界上第一根最长的被用于实际地下电网中的 HTS 电缆线路。

表 3.7-7 Albany 工程电缆系统的规范

额定电压(kV)		34.5
标称电流(A)		800
高温超导电缆	型式	3 芯在一个低温管中
	长度(m)	350(320+30)
	电缆统	pplp(木纤维复合聚丙烯薄膜)，液氮浸渍
	附件	2 个终端箱(在空气中)和连接(在接头室中)
敷设		地下(6 英寸管)
制冷系统		过冷液氮循环

3.4 钇钡铜氧(YBCO)镀膜超导体

虽然第一代高温超导带已经开始商业化生产，并且已在超导电力电缆等示范性工程中获得应用，但由于在成本等方面的障碍，目前仍无法大规模的推广应用。第一，以铋系带材为代表的第一代高温超导带，就其超导电流密度和电流传输性能而言无法与钇—钡—铜—氧高温超导镀膜带相比；第二，铋系带材在磁场中其超导电流衰减非常快，亦即在外磁中，当磁场强度超过一定值后，会失去其超导电性，然而大多数能源、电力领域的应用往往与强磁场有关，所以第一代高温超导带材无法在大多数中等程度以上的磁场下应用；第三，因为银是贵金属，原材料成本较高，故采用 PIT 技术生产的第一代铋系高温超导带的成本很难降低到与传统的铜导线竞争的价位，目前仍在 $50～200/kAm 范围内。根据美国能源部的估算，高温超导带材大规模商业化应用的性能价格比应为 $10/kAm，只有当高温超导带的性能价格比达到该指标后，才有可能大规模替代传统的铜导线。相比之下，概括起来，第二代 YBCO 镀膜高温超导带有下列优点：

(1) 电流密度可高达 1MA/cm²，1μm 厚的 YBCO 层可承载电流 100A(在 77K 下，带宽 1cm)。

(2) 如图 3.7-11 所示，具有高的不可逆线，不可逆线是超导临界电流的极限(在磁场/温度水平下)。因而，在给定的磁场下，YBCO—123 的温度远高于 BSCCO—2223。

(3) 在某种构形下交流损耗较低，线易于预防故障电流。

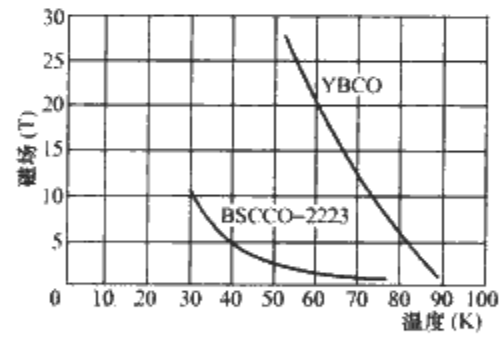


图 3.7-11 BSCCO—2223 和 YBCO 的不可逆磁场与温度的关系

(4) 价格可能较低，有可能达铜的性能价格比 $15～25/kAm 的水平，这将比第一代高温超导线低 2～5 倍。

鉴于第二代高温超带材的这些优点和对国民经济的重要性，以及经十多年的研发，已接近大规模市场化应用的边缘这一事实，自 2000 年以后，美国、日本、德国、韩国等国已组建了国家实验室与工业界相结合的研发机构，对第二代高温超导体[Y—B—Cu—O，Ho—B—Cu—O(钬—钡—铜—氧)]进行工业化研发，目前进展较快。例如国际处于技术领先和技术先进水平的企业如美国超导公司(AMSC)于 2004 年 7 月试制的 32m 和 34m YBCO 超导带，其临界电流达到 160～180A/cm 宽水平；2004年日本藤仓电线公司制造的YBCO高温超导带，

带长105m，其临界电流达到126A/cm宽，为当时世界先进水平。据2006年11月报导，日本高温超导YBCO镀膜带的研发已达到了I_c为245A，长212m的水平；至2005年美国IGC公司的"Super Power公司宣布其研发的第二代高温超导带达到206m长，临界电流密度100A以上水平(带宽为1cm)，为现今的最高水平。第二代高温超导带商业性应用的阈值(门槛值)为临界电流大于或等于300A/cm宽(100m以上带长)。

第二代镀膜高温超导体的基本原理是使用一根坚固的大长度基带，在基带上带有高度织构化的界面和一层外延YBCO膜，这个膜复制了界面的织构，从而达到高的超导电流密度。因而它是一种复合的，金属支持的，多功能的，多层氧化物结构(见图3.7-12、图3.7-13)。

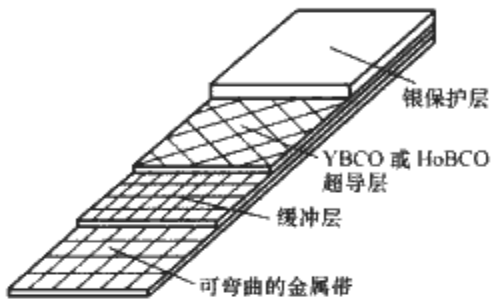


图3.7-12 第二代镀膜高温超导带简化的结构示意图

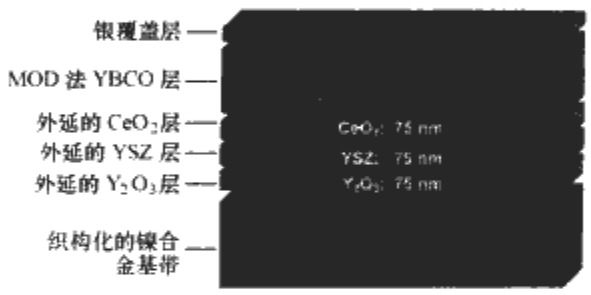


图3.7-13 美国超导公司RABiTS™/MOD法第二代镀膜高温超导带结构

第二代高温超导带材的关键技术与制造工艺，正在不断开发之中，总的来说，主要涉及下列几个方面：

(1) 金属基带。金属基带主要以不锈钢和镍合金(无磁或弱磁)为主，基带宽通常为1cm，厚度在40～100μm之间，采用冷轧工艺生产的基带以镍—钨合金为主。

(2) 阻挡或缓冲层。如果直接在基带上生长钇—钡—铜—氧或钬—钡—铜—氧，则无法取得优良的超导性能，这是因为基带本身微观结构并不完美，一般为多晶结构，而非单晶结构，此外，金属元素在YBCO或HoBCO超导层生长过程中会扩散进入超导层，进而破坏其超导电性。为了改进超导层的外延晶体结构的质量及阻挡化学扩散，从而在金属基带上需要生长一层很薄的氧化物阻挡层或缓冲层，它典型的厚度为小于0.5μm。隔离层可采用工业界普遍采用的磁控管溅射、电子束蒸发镀膜等手段，这种已相当成熟，但为了规模生产，尚需将镀膜设备大型化。

(3) 钇—钡—铜—氧或钬—钡—铜—氧超导层。超导层的生长是制备第二代高温超导带的关键，超导层的质量决定了超导带所能传输电流的大小，超导电流直接与超导带的价格性能比有关，所以能否制备出具有很高超导电流传输能力的带材是大规模商业化应用的关键。目前生长YBCO超导层的方法主要有：激光镀膜法、溶液法和化学气相沉积法。因为激光镀膜法具有很好的稳定性和重复性，所以用该方法生长YBCO超导带材具有很好的超导性能，所以在日、美、德激光镀膜法最为流行，其他的方法虽然目前还不太成熟，但考虑到其成本等优势，看来仍有发展的空间。例如日本住友电工，选用稀土元素钬(Holmium)不用通常使用的钇，以改进沉积，达到高速沉积的目的(见图3.7-14)。超导层的厚度为1～5μm。

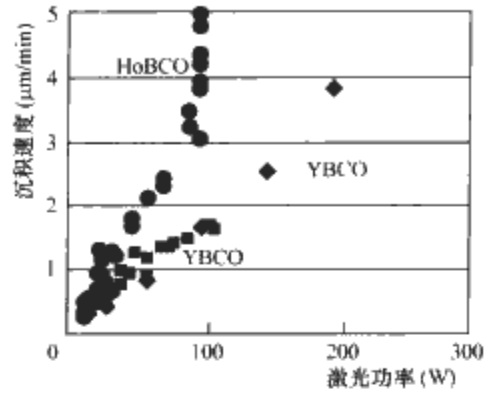


图3.7-14 HoBCO超导层的高速沉积(脉冲激光沉积)

(4) 银保护层、铜保护层和稳定层。保护层一般为1μm厚的银，其目的是防止超导层直接与水蒸气、大气、液氮等外界媒质接触，以免引起表面化学反应，使超导性能随着时间的推移而缓慢退化，银保护层可用简单的热蒸发技术，并且厚度只有1μm左右，所以对成本不会构成太大影响。此外，还有较厚的铜保护和稳定层，以起到电气保护和机械稳定的作用。

近十年来，第二代高温超导带研发的目标主要围绕着：选择低价的工艺技术、具有双轴织构化界面的基带和超导层本身的研究。其面临挑战的实质主要在于：

(1) 对基带可供选择的方法。

1) 倾斜基底沉积法(ISD法)。ISD法在织构化程度及其相应的电气性都不如其他方法好，目前已不被主要地关注。

2) 离子束辅助沉积法(IBAD法)。IBAD法在基底上沉积一层织构化的氧化钇—稳定化的氧化锆(YSZ)或钆锆酸盐(GZO)或氧化镁(MgO)。IBAD—YSZ的沉积方法太慢，在大批生产时就会很贵；IBAD—GZO的沉积方法虽然速度提高了一些，但还达不到低价的目标；IBAD—MgO的沉积方法，现在已证明要获得更长的带是极其困难的。

3) 轧制变形和再结晶退火法(RABiTS法)。RABiTS法现已使用更高机械性能和减少磁性的含有5(原子)%钨的镍，代替纯镍的基带材料，并且织构化的程度达到了低于6°及以下，在这个水平下，晶粒边界障碍电流流动开始完全消失，从而电流密度能够接近达到YBCO单晶的水平。此外，该种方法需要给予的缓冲层能保持比较薄；基带材料的加工—变形和退火是比较经济的，从而能够达到很低的制造价格。

(2) 对缓冲层的开发。缓冲层亦在积极地开发之中。目前，实际上所有的方法都使用了多功能缓冲层。在缓冲层中，作为金属—氧化物界面的籽晶、作为金属和氧的扩散阻挡层和作为与YBCO界面晶格相匹配的罩层等功能都是相互独立的。有多种此类结构可供选择，Y_2O_3、Gd_2O_3或NiO的籽晶都已被使用。YSZ是最通用的Ni扩散阻挡层或缓冲层，而CeO_2通常是用作与YBCO相匹配的罩层界面。IBAD—MgO缓冲层亦在快速开发。

对RABiTS法要获得一个有效的氧化物缓冲层和一致的外延生长。这种缓冲层必须在金属氧化物界面的一边到另一边给予良好的附着力、起到来自基底的金属原子扩散的阻挡的作用和为YBCO层生长的一个界面。如图3.7-13所示，第一层用Y_2O_3或C_eO_2，它们在金属—氧化物界面的两侧有最佳的附着力和外延生长；第二层用YSZ，它可阻断金属原子

扩散：第三层用 C_eO_2，它可形成一个优秀的样模(Template)，以便 YBCO 生长。所有这些缓冲层都能高度重复和优秀地外延生长。美国超导公司就用这种方法制造这些薄层，并用的是磁控管溅射沉积，由此，足以有效地降低价格。

利用纳米技术表面处理，有助于在金属合金基底上获得高质量的缓冲层。据近年报道，使用金属—有机沉积(MOD)技术制造两层而不是三层的缓冲层，可以避免完全地使用真空沉积。使用 $La_2Zr_2O_7$ 和 CeO_2 两层缓冲层已初步证明仍需优化和解决上规模的连续处理问题，以符合由三层(Y_2O_3/YSZ/CeO_2)所达到的性能。

(3) 对超导层可供选择的方法。对关键性的外延 YBCO 层，世界上已经开发了许多不同的沉积方法，如快速脉冲激光沉积法(PLD 法)、快速电子束沉积法、引导低成本选择的液相化学路线、金属—有机沉积法(MOD 法)或基于金属—有机的一化学蒸发沉积法(MOCVD 法)，并在短样中都已达到了高的临界电流。因此，在这些方法中，如何降低成本成为驱动力。尽管用 MOCVD 法已做出了相当长的线，但这些线的性能仍低于低价的 MOD 法的水平。

与 MOCVD 法相比，用液相技术去建立第二代高温超导带的超导层提供了很低的价格，因为该方法简化了沉积过程、所有产物母体材料获得有效的使用和为反应这产物母体成超导态所需的炉子的价格相当地低。认为，已最成功的 MOD 法(金属—有机沉积技术)用的是液体基金属—有机三氟乙酸盐(TFA)的产物母体，带有 Y、Ba、Cu 阳离子的 TFA 产物母体按化学计算的比例混合(在带有要求的黏度和使用旋 涂(Spin-Coating)[对短样] 或缝隙—模子涂膜[对长样]的乙醇溶剂中混合)。这种方法是一种离原位法，那是因为在以后的炉子处理是需要的，首先去分解，然后把产物母体反应成 YBCO。这种离原位法的优点在于：为分离含 C 的有机物的分解阶段是和为生长无 C YBCO 相的反应阶段是分开的。MOD 法可导致大面积的覆盖范围，这样能使宽带和薄片的处理成为可能，而后纵向切开达到要求的宽度，该方法带的价格几乎随带的宽度增加而下降。早期的 MOD 法要增加 YBCO 镀膜厚度的速度相当地慢，但现在已被优化了，其速度水平已高达 4nm/s，这个数值再兼有其他的优点时就成了价格最低的 YBCO 法。早期的 MOD 法与真空法一如 PLD 法或 MOCVD 法相比，似乎没有后者那样高的性能，且后者镀膜的厚度可高达 5μm，而前者为反应单层 MOD 膜超过 1μm 的厚度就困难的了。但现实的事实表明，MOD 膜的性能是高的或较高的。近年美国超导公司的 MOD 法提供了世界上最高的性能，远高于其他基于盘—盘的真空法的成果。这是通过在 1μm 厚的 MOD 膜上具有高的电流密度来达到的，而且生长多层 MOD 膜的实用性已被证实，为明显地进一步提高 MOD 的性能打开了大门。

(4) 对第二代高温超导带连续制造工艺技术的优化选择。要使生产的第二代高温超导带质量稳定、可靠，长度长，价格低，这是各制造公司追求的目标，也是他们专利技术的所在，美国超导公司制造 2GHTS 带的工艺过程如图 3.7-15 所示。据该公司研发表明：使用 Ni-5(原子)%w 材料(弱磁性)可获得好的机械性能和优秀的织构(低到 6°～4° FWHM)；使用 NiCrW 合金，带材的临界电流密度已可达 1MA/cm²；典型的基带厚度为 75μm，但 50μm 的亦可获得高的工程电流密度，甚至更薄的亦可能获得高的工程电流密度；薄的 Y_2O_3/YSZ/CeO_2 缓冲层可达 1MA/cm² 的性能；RABiTS/MOD 法工艺的重复性好，并可稳定获得 1μm 厚，高性能的 YBCO 超导层。

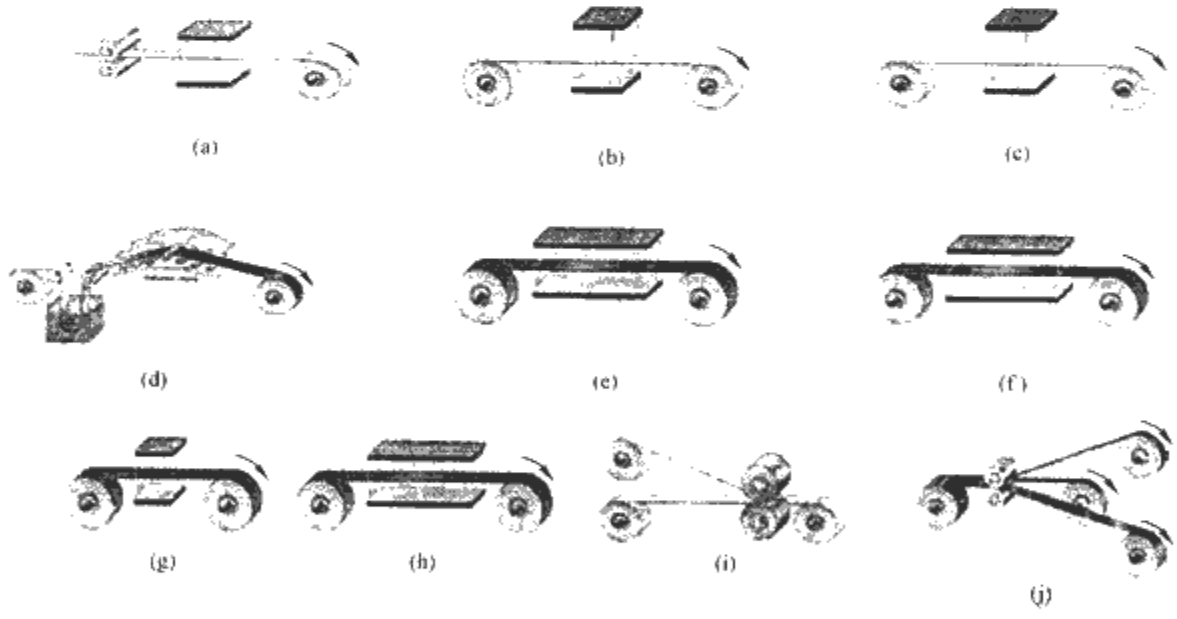


图 3.7-15 美国超导公司制造 2GHTS 带的 RABiTS/MOD 法工艺过程
(10cm 宽带分切成 20 根 4mm 的窄带)
(a)基带制造；(b)纳米技术表面处理；(c)缓冲层沉积；(d)镀 YBCO 的先驱物；(e)先驱物分解；(f)带有纳米弥散的 YBCO 反应；(g)沉积银；(h)充氧热处理；(i)复合；(j)薄条分切

(5) 对实用的第二代高温超导带的研发。对实用化的第二代高温超导带，在要求的磁场下不仅要有高的 T_c、J_c 和 I_c，而且必须考虑增加载流容量，并具有足够的机械和电气的稳定性。现在，全世界集中在研究用一根基带两面沉积的办法使 2GHTS 带的载流量翻倍的可能性。美国超导公司已研发了“中性轴 2GHTS 带”和“面对面 2GHTS 带”的结构(见图 3.7-16 和图 3.7-17)。“中性轴”结构的设计概念是基于当带材处于允许的弯曲应变下最大的张应力在凸面上，而最大的压应力在弯曲的内表面(凹面)上，因此这种结构将使超导层处于最有利的位置(也即在这种带的中心面上拉应变和压应变被为零，因而这种带具有最佳的机械性能)。如果在带的超导层上沉积一层薄的银层，并且用钎焊的办法将一根硬铜带焊在其上，使硬铜带和基带具有相同的性能(铜带和基带的厚度相同)，中性轴被位于 YBCO 层上。这层铜带被称作稳定层，它可起到稳定机械和电气性能的作用。如果这种带材在不弯曲的情况下，拉和压的性能亦会改善，因为铜有助于缓和应力的上升。“中性轴”结构，亦给予 YBCO 层环境保护，使得带材耐用和容易操作。对实用和耐用的带材而

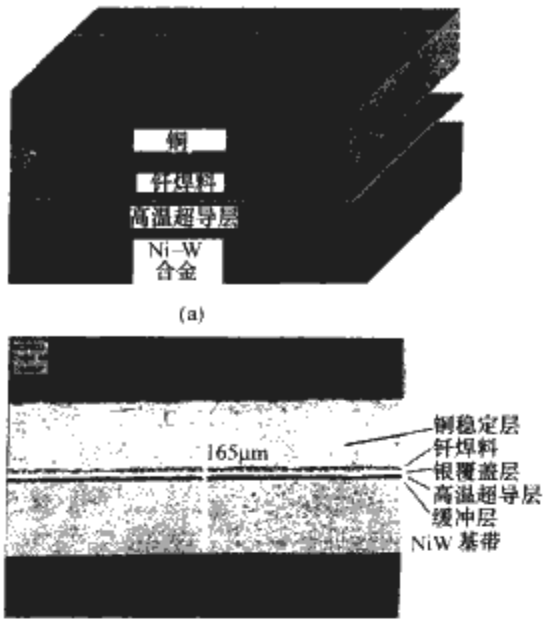


图 3.7-16　美国超导公司已研发情况 1

(a)“中性轴 2G 带”结构；(b)“中性轴 2G 带”横截面—光学显微镜照片

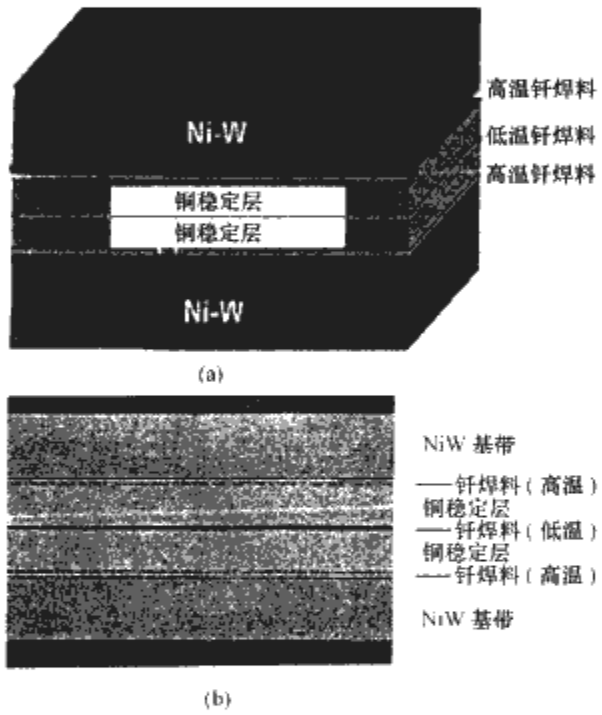


图 3.7-17　美国超导公司已研发情况 2

(a)“面对面 2G 带”结构；(b)“面对面 2G 带”横截面—光学显微镜照片

言必须要有足够的“电气稳定化”。因为一根耐用的带材必须对小缺陷不是敏感的，并因 2G 带的有效横截面积非常的小。甚至浸在液氮中的情况下，经计算一个几十微米厚的稳定层是需要的，以避免由裂纹引起的对超导层的完全破坏。这种要求在实施冷却的线圈中更为苛刻。这种稳定层在过电流的情况下——如由于在电系统上的事故，而引起的过流，亦可起到保护的作用(见图 3.7-18)。“中性轴”2GHTS 带在

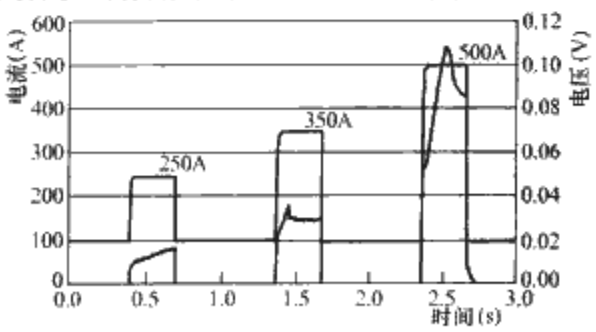


图 3.7-18　“中性轴”带验证稳定性的过电流试验-过电流达到 $4\times I_c$，保持 300ms 仍可恢复

液氮中的测量结果表明：对 300ms 的脉冲(典型的事故)达到 4 倍临界电流时仍没有发现热失控。“面对面”结构的设计概念是使用两层 YBCO，使电流翻倍。两根带材用钎焊料把它们结合在一起，此处的钎焊用的是低温钎焊料，其熔点要低于用于铜—银结合的钎焊料的熔点。这种“面对面”结构的优点在于：尽管 YBCO 层比不稳定化的带材更接近中性轴，但 YBCO 层仍然不是精确地处于中性轴上的。中间的稳定层的存在，当在两个 YBCO 层中的一个存在缺陷的情况下，允许在两个 YBCO 层之间的电流共用。“面对面”2GHTS 带的尺寸可以做得非常接近 1G 带的尺寸，以便设计替代。该种带的厚度约 0.03cm、宽 0.4cm，在有关的机、电参数方面，将符合或超过 1G 带的性能，这样将使用户加速接受 2GHTS 带材。

2GHTS 带材的研发正在不断进步，其中包括制造工艺、制品的重复性、均匀性、临界电流和长度等，并且也用于原型电缆和线圈等的试验。美国超导公司的结果如图 3.7-19 所示。2003 年 7 月用“中性轴”2GHTS 带试制的 1.25m 原型超导电缆，带长 45m，电缆结构两层超导带，在南方线材公司绞制，在 77K 下示范试验电流 4200A(直流)和 2600A(交流)，对商用电缆而言，这性能水平是合适的。带材在经受绞制的应力下，电性能没有损失；由米级长的“中性轴”带试制的小线圈，磁场达到 25T(在 4.2K 下)，显示出电流接近 350A/cm—宽，在 25T 下的工程电流密度约为 20 000A/cm^2。这对将来高场镶嵌件的设计(用于高场 NMR)是合适的。对电缆应用感兴趣的是 0.4mm 宽的带材，到目前为止，连续 MOD 法带材的电流已达到 272A/cm-宽，对应 0.4cm 宽的带，其数值几乎相当为 110A，如做成“面对面”

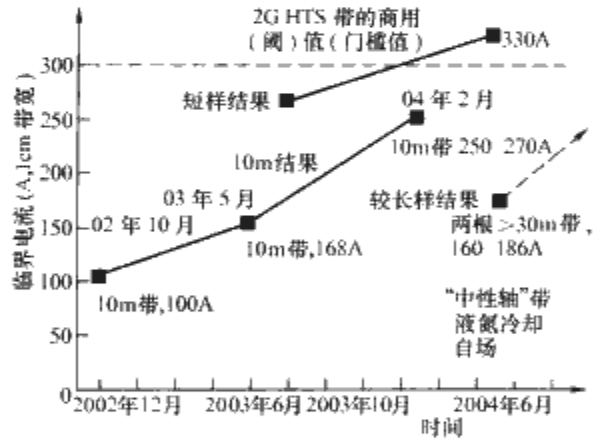
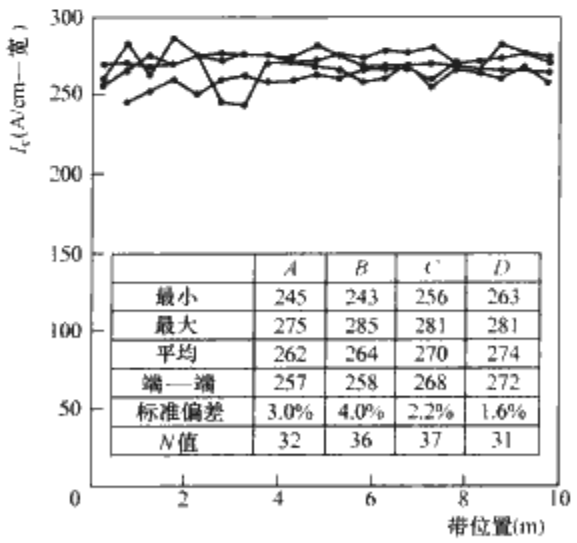


图 3.7-19(a)　美国超导公司 2G 带的进展

结构的带材，电流将会翻倍达到 220A，这将高于在现今能



	A	B	C	D
最小	245	243	256	263
最大	275	285	281	281
平均	262	264	270	274
端—端	257	258	268	272
标准偏差	3.0%	4.0%	2.2%	1.6%
N 值	32	36	37	31

图 3.7-19(b)　美国超导公司 2G 带的工艺水平

2004 年 2 月，4 个样品超过 250A/cm—宽(77K)，并高度均匀和重复

注：电场判别标准为 1μV/cm。

达到的 1GHTS 带的水平。另一个很重要的指标是带的均匀性，其标准偏差小于 4%。还有一个度量带材质量的标准是指数值 n，n 为电压—电流关系 $U\sim I^n$ 的特性值。这些数值[图 3.7-19(b)]都超过 30，由此可以确认铜稳定层几乎没有分流。

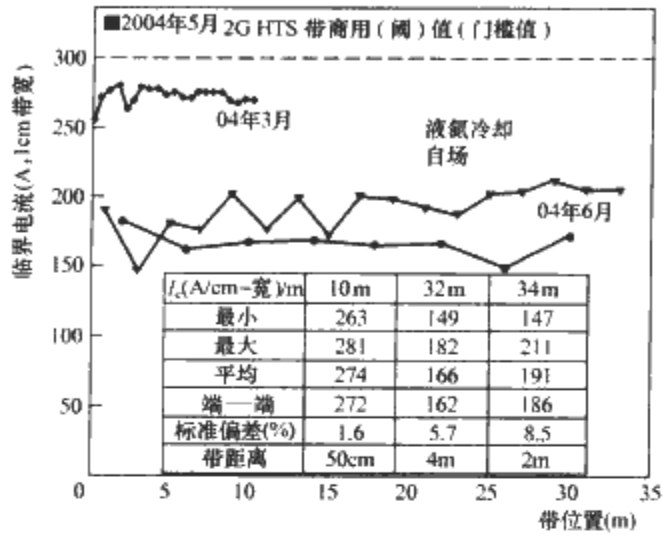


图 3.7-19(c) “中性轴”2GHTS 带增加长度

(6) 钉扎：在磁场中高电流密度的研究。用于电力电缆的高温超导带，希望具有高的 J_c 值，以降低交流损耗，但在电缆中的自场比较低，只有零点几个 T 的水平。然而，在实际的 1G 带线圈应用中，如电动机、发电机等需要 1～3T 的磁场，且典型地运行在 30～35K 温度下。在给定的温度下，通常电流密度随磁场增加而降低。因为 2G YBCO 超导带具有较高的不可逆线(见图 3.7-11)，所以 2GHTS 带有可能比 1G HTS 带运行在较高的温度下。为了达到在磁场中提高电流密度这个目的，深入研究“超导磁通钉扎”就有着重要的现实意义。根据电磁学理论钉扎是达到高电流流动的关键，为此需研究纳米技术，在 YBCO 基体中引入纳米尺寸的缺陷(如将 Y_2O_3 微粒弥散引入 PLD/YBCO 或 MOD 法中)，从而提高在磁场中的电流密度。另外研究发现超导体电性能的提高与磁场角有关。因而钉扎现象另一个重要的方面是 J_c 与磁场角的关系，它取决于钉扎缺陷的形式和取向，沿着不同的磁场方向钉扎可以是不同的。纳米弥散改善了 2G 带中磁场角与 I_c 的关系。对这些工作的深入研究和问题的解决将使 2G 线圈在高于 1G 线圈的温度下工作成为可能。

综上所述，目前 1G、2G 和 3G 高温超导体的现状可大致归纳如下(表 3.7-8)。

表 3.7-8 目前 1G、2G 和 3G 高温超导体的现状

代(G) 现状	1G	2G	3G①
材料	BSCCO	RE-123(Y/HoBCO)	DI-BSCCO
I_c	150A/4mm 或低于(<375A/cm)	200(～300A/cm)	200A/4mm 或(>500A/cm)
制造工艺	常压	正在研发	过压
应用	试用	正在规划	电缆、电机、NMR/MRI、磁体
进展	似乎已成熟	在热情研发	试用

① 日本住友电工称 3 代(3G)带材。

第8章 特 种 导 体

特种电线电缆用的特种导体有许多，本章主要涉及音响线缆用的导体，其中单晶铜只是导体之一；半导体封装用的键合线，它实际上是为连续焊接用的焊接线；新一代无模拉线制造的玻璃膜微细线已具有了磁性和导电的功能，由此开拓了新的应用领域。

1 单晶铜及其在音响线缆上的应用

音响线缆由于其独特的使用要求，对音响线缆的产品结构、材料、生产工艺都有特别的技术要求。既然它有独特的要求，产品的成本就会大幅度提高，这就促成音响线缆的成品价格远远高于一般电线电缆。尽管音响线缆的特殊要求和复杂的制造工艺使许多制造厂感到为难，但丰厚的利润还是吸引了不少制造厂，特别是国外许多厂商都花了大量人力、财力潜心研究，制造出许多高级音响线缆产品。我国在这方面的研究、开发尚处初级阶段，但随着人们生活水平的提高，音响线缆产品需求量的日益渐增，使国内许多厂商对音响线缆跃跃欲试。音响线缆市场竞争也非常激烈，国内外各制造商都互相高度封锁技术信息，所以到目前为止国内外音响线缆标准还鲜为人知。

自20世纪70、80年代Hi-Fi(高保真)和AV(音视)音响开始发展以来，音响线缆就应运而生。所谓音响线指的是在音响系统中的电源线、喇叭线、信号线以及数码线等，它是音响装置的重要组成部件，它担负着音频信号的传输，其质量直接关系到一套音响装置能否达到应有的技术指标或者说能否使发烧友们享受美妙动听的音质和音色。音响线按其功能可以分为微电流传输信号线和大电流传输喇叭线两个大类。

影响一套音响装置的音质和音色的原因是很多的，就音响线缆而言，其组成除导体外，还有绝缘、屏蔽、护套和插接件等。本文所阐述的主要是音响线用的导体。就导体而言，国外的材料和音响界已下了许多工夫，可以说完全不亚于在整个音响系统中对其他装置和材料所下的工夫，从中也可看出导体的作用和重要性。

1.1 音响线缆用导体及其发展

音响线缆用的导体或称导线，其材质和导线的制造技术是音响技术中的高科技之一。从历史的发展和目前的应用情况看，所谓材质已涉及了纯金属、合金，甚至复合金属；纯金属的纯度[已达到8N(即8个9)的超高纯度]；导线的成分、结晶状态和内应力；导线的形状、尺寸和绞制方式。有关音响导线的制造技术已涉及了高真空冶炼、超高纯无氧铜(7N纯)和定向凝固、超高纯分析、双金属复合(包括镀制)和微细线制造等高新技术。在历史上曾应用或目前尚在应用的导线可归纳如下：

(1) 银线(银4N纯度)。银的电导率比铜高，约为108.4%IACS，电子信号在银线中的运行速度更快，与铜线相比估计几毫微秒，耳朵灵敏的发烧友可能会分辨出来。优秀的银线在听感上能增加透明度及速度感，但它的低音量感则较铜略逊。而且如果银未经小心处理，那么就算是品质一般的铜线也能比它发出更动听的声音，这是一些制造厂得出的结论。对同样的镀银铜线，在传导一个音响信号时，未必比纯铜线来得悦耳，它就好像高音单元在你耳边上鸣响一样，有些稍许刺耳、过于光辉的效果。但如果应用在影视AV、射频或数码方面，优质的镀银铜线变得价值超卓，更胜高级纯铜线。

(2) 金线。金的电导率比银和铜差，约为78.7%IACS，这种材料在失真性方面不甚理想，而且成本又极高。传统的观念认为铜插接件上采用镀金的方法能提高音质，但实际上连一些顶级的线材厂也认为之所以采用镀金，最主要的作用是因为它是贵金属和不易生锈，音质还在其次。

(3) 无氧铜线。音响线缆用线由韧铜线(包括低氧铜线)发展成应用无氧铜线，特别是高纯(4N纯)或超高纯(8N纯以下)再加长颗粒结晶(LG—OFC)无氧铜、线性结晶(LC—OFC)无氧铜和超长颗粒结晶或称单晶(PCOCC)无氧铜的应用(在拉成要求规格的导线后经退火处理以消除其内应力)，在提高音响导线的材质上有了新的飞跃发展。经研究认为铜中的氧，以氧化铜的形式存在以及铜中其他杂质元素的存在，不仅影响电导率，更重要的是还会对其本身的噪声大小产生重要的影响。导线中所含杂质越多，其噪声也就越大。这是因为导线传输电流的过程实际上就是电子在电场作用下有序流动的过程，如果导线中含有杂质，就势必会使电子在流动的过程中撞击在杂质上，从而使电流的流量发生随机性变化，这种电流流量的随机性变化本身就是所谓的随机噪声。现在高档音响导线均采用无氧铜，且其纯度不断攀高甚至已达7N、8N超高纯度是其原因所在，总之其目的就是为尽可能地降低导线本身产生的随机噪声。至于目前能工业生产的无氧铜，其含氧量已可达5～10ppm，甚至可达1～2ppm的水平。作为导线材料，一般的低氧铜每米晶粒数可达约1500个，而无氧铜只有约50个，高纯单晶无氧铜更只有0.008个。由于低氧韧铜(含氧量230～240ppm)杆与无氧铜杆制造方法的不同，无氧铜除具有含氧量很低的特征外，另一个特征就是晶粒粗大，所以每米的晶粒数就大大减少。如果采用新的制造方法，如热型定向凝固等，可使晶粒数进一步减到几个，甚至只有1个，这就成了所谓的单晶铜。随着晶粒数的减少，也就减少了晶粒间的界面，从而减少了因晶粒界面障壁形成的传输界面失真，使声音更为清晰平滑和动态更大，这就是要从多晶粒趋向少晶粒和单晶粒的原因所在。对无氧铜而言，由于制造工艺的不同，在铸造和引出过程中所产生的晶粒数越少，也即晶粒所能达到的长度，对听觉的贡献最为重要。按此要求，LG—OFC、LC—OFC和PCOCC(原意为用OCC法制造的纯铜)—OFC将逐趋更佳。LC—OFC[为大的轴向柱状结晶的组织(Linear—Crystal，也称线性结晶)]是日本日立公司的专利，材料的纯度可达6N，这种无氧铜在加工时仔细牵行操作，每米内可达约70～80个晶粒，采用这种铜线比用一般无氧铜线或LG—OFC长颗粒结晶无氧铜线聆听得到的改良程度就较为明显。PCOCC于20世纪80年代后期在世界上首次开发，并获得大量生产。称之为PCOCC的这个日本专利，最令人留意和

感兴趣的特征是其单晶晶粒特别巨大细长，在线拉伸到 0.1mm 时，宣称长度可达 1100m 以上。照此计算 2m 长的信号线只有一个单晶体，这显然比 LC—OFC 的性能更优越得多。PCOCC 线具备了信号传输上的重要特性，它在传输方向上达到了最少杂质的影响，极少或无晶粒边界阻碍，具有平滑的表面和特佳的柔顺性，因而可以传递极为清晰的信号。

(4) 功能完美铜线(Functionally Perfect Copper，FPC)。美国有名的“Audioquest”公司在 20 世纪 80 年代后期推出了与 PCOCC 相媲美的“功能完美铜线”应用于高级音响商品线缆上。FPC 其实也是无氧铜，其单晶晶粒长度(以大多数音响线中的粗线衡量，FPC 一个单晶晶粒超过 700m 长)似乎与 PCOCC 差不多，比 LC—OFC 改善程度十分明显，但在材料的纯度上更加用心。后来“Audioquest”公司推出的 FPC—6 高纯度线，其纯度达 6N，比普通的 FPC—4 要高出 2N。在常见的 LG—OFC 和 FPC 中主要的杂质是铁、银、硫及少量锑、铝、砷，FPC—6 含氧量只有 19×10^{-6} ppm，含银为 0.25ppm，其他杂质少于 0.05ppm，对音质的原音重现具有相当明显的优点。图 3.8-1 示出了 OFC、LC—OFC 和 FPC/PCOCC 铸拉杆晶粒示意图。

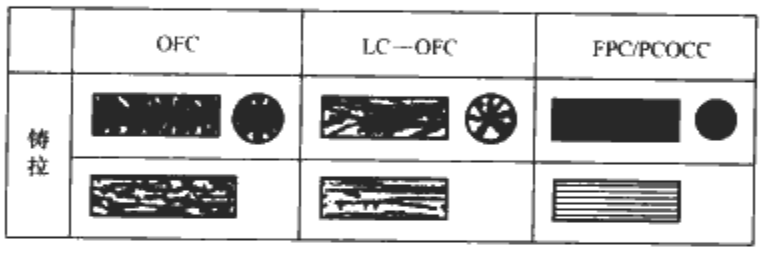


图 3.8-1 OFC、LC—OFC 和 FPC/PCOCC 铸拉杆晶粒示意图

(5) 和谐合金线(Consonant Alloy)。在 1995 年美国有名的“TARALABS”公司与美国太空总署合作，取得了“和谐合金”的独家使用权和销售权。该种合金线经美国加州“Smith Laboratory Incorporation”实验室测定，认为和谐合金的电导率比现有市场任何品种材质的“发烧线”都高，效果远胜 8N 纯铜，无论超低频、音场和定位或空气感等音效的听感上均有明显的改善。由此，“Taralabs”公司都以“和谐合金”用于整个顶级系列产品上，如数码同轴线等，务求再创登峰造极的产品。

除上述导线材质种类、纯度、结晶状态等因素以外，下列因素也影响导线的音响效果。这是由于当前音响器材的传真度和灵敏度有较大的提高，因此信号传输要求也越来越高。如信号线是用来传输数码脉冲信号或者音频交流信号的，它的传输原理比一般的直流电传输复杂得多。除了电流流过导线时会受到导线的电导率影响和产生磁场以外，还有高低频率之间的集肤效应、相位失真等影响：

1) 导线的形状和绞合结构的影响。导线如要对称、低失真地传输全音频段(20Hz～20kHz)或更广阔的信号，那么对导线线芯的结构设计就非常重要。目前导线的绞合无非是“同心绞”、“束绞”和“复绞”三种。早先的信号线基本上都采用单芯结构的同轴电缆，不过后来发现，一般的同轴电缆其内导体只为一根单线，单线太细会增加电阻，不利于低频信号的传输；太粗则由于集肤效应使高频信号传输效率降低。因此，有人将多根双零线绞合成一根导线，用于低频至高频不同频段的信号传送。但又有发现，细线的截面较小，中低频段信号的“传输效率”较高频差，所以他们利用直径不同的导线，并分别绝缘，组成不同直径的绝缘线芯来承担不同频段信号的传输。德国 ELEO 公司生产的 2500S 和 4000S 音响线采用十分细的镀银高纯铜线编织成扁平状带，据报道能有效地降低集肤效应的影响，使音质清晰而柔顺。

美国 Taralabs 公司通过用恒流电阻抗测试法(Constant Current Impedance Testing)对音响线进行研究，并推出了“矩形实芯线”(Rectangular Solid Core)系列产品，深受发烧友的好评。采用恒流电阻抗测试法，研究不同导线结构和排列，测试电阻抗与频率的线性度(见图 3.8-2)，对导线的性能，这两个参数是非常重要而必须的指标。因为它们直接影响到上升时间(脉冲前沿从它的最大振幅的 10%上升到 90%所需的时间)和相位的一致性。也即直接影响到导线的“声音”的活生感。据图 3.8-2 得到的结论是采用 1 根 $2mm^2$ 的圆铜线，效果是低音频率和中音频带较为温和，而高音频带暗哑(此时频率电阻值上移明显)；采用 2 根各为 $1mm^2$ 的圆铜线，低音频带与中音频带较为清晰，分析力较好，高音清晰度增强(此时频率电阻值上移减弱，声音总体上感到自然和谐)；当截面不变，仍为 $2mm^2$，但用两根各为 $1mm^2$ 的矩形铜线，低音和中音更为平和而有生气，高频的声音与中频一样生动和谐自然，接近原声，这 3 种线中音效果最好的一种。由此“TaraLabs”公司得出结论，用同样的材质设计的线，要使其频率特性优良，解析力好，透明度高，音色更加纯真自然，就要使用较细的、并有矩形形状的导线进行特定的组合排列。图 3.8-3 示出了具有相同截面积而形状及排列方式均不同的频率线性及放音效果，图 3.8-3(d)为一组导线效果最佳。这就是 TaraLabs 研制的矩形实心线的由来。图 3.8-4 示出了具有相同截面的单根导线和多股绞线，它们的集肤效应效果相同，对高频都有衰减。

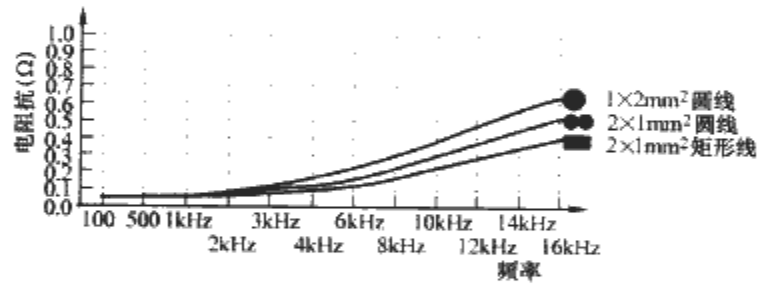


图 3.8-2 电阻抗与频率的线性度

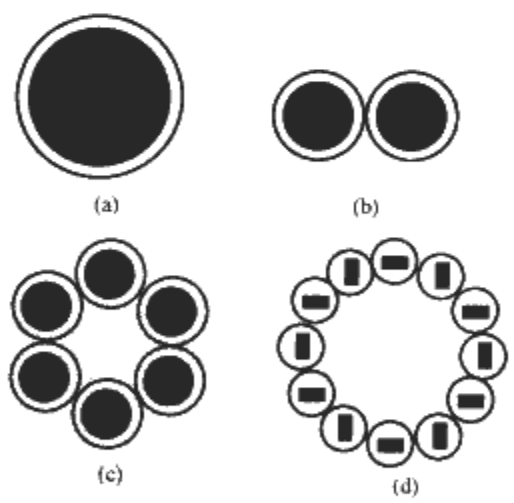


图 3.8-3 导线截面相同而形状及排列方式均不同的频率线性和放音效果
(a)不好；(b)一般；(c)较好；(d)好

2) 拉线变形后内应力的影响。日本能源 Acrotec 的理论认为，经拉线变形后的导线中存在的内应力，会影响音响效果。这是由于内应力致使晶格畸变造成的，所以要采用特殊的热处理，以消除内应力，使结构稳定，由此消除由变形造成信号传输上的障碍，并使导线变得柔软。

3) 导线表面光滑度的影响。据研究表明，5N、6N，甚

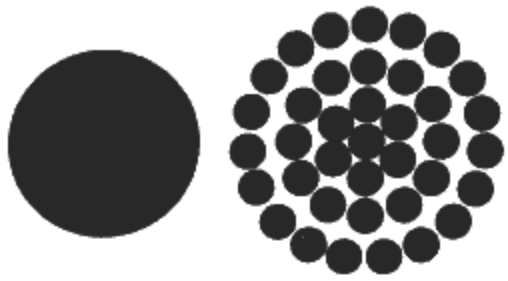


图 3.8-4 同截面的单线和绞线
具有相同的集肤效应的效果

至 8N 的高纯度导线，用显微镜放大 200 倍后，会发现导线的表面是凹凸不平的，而这种凹凸不平会使音乐信号通过时产生不良的影响。因为电流流动时，是沿着导体的表面而行的，凹凸不平的表面令电流行走时产生一种漩涡，致使瞬态减慢流速，这是其一。此外，更因使用的各种绝缘层包括聚四氟乙烯(Teflon)或聚乙烯(Polyethylene)不能 100%地贴体覆盖导体，这样必然使导体凹入或凸出的附近产生一定的空隙，就因为这些空隙，在其中集积的氧气足以令导体的表层产生氧化，更严重的是氧气遇上电流通过时会产生电感。无论漩涡还是氧化和电感均会对超高频、空气感和瞬变等构成损害，同时高频的损失也尤为严重。图 3.8-5 直观地示出了导体表面光滑度与电流流通的图像。美国"TARALABS"公司为了解决这一问题，利用激光将 8N 的 RSC™ 导线的表面扫平，使导体的表面在 200 倍显微镜下观察仍然光滑如镜(未经激光扫平的 8N 纯 RSC 导线同样与其他昂贵的传统圆柱形导线一样呈现表面凹凸的现象)，这样绝缘体与导体之间不会留下半点空隙与氧气，音源信号在畅通无阻和平滑如镜的高纯 RSC 导体上运行，此时的失真从理论上讲是极低的，音效也极为精致幼细，瞬变一定更快，音色更自然透明。据报导此种 RSC™ 导线使信号在表面效应上比传统圆柱形导体在相同截面的线径下，能增加 80%的传播能力，再配合使用 8N 纯度的和谐合金制作，令音效超凡脱俗，使销量直线上升，这就是 TARALABS 公司推出的最顶级的"The one"系列数码信号线和喇叭线的技术突破之一的奥秘。

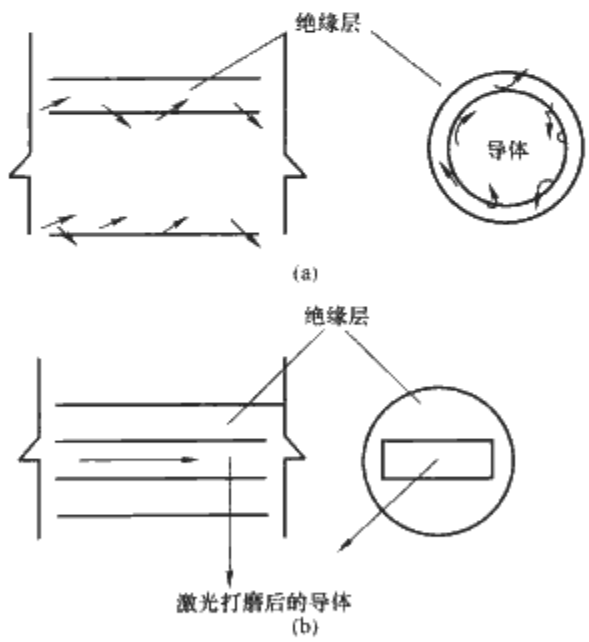


图 3.8-5 导体表面光滑度
与电流流通的图像
(a)常见的导体电流流通时的图像；(b)导体
打磨后的 RSC 导体电流流通时的图像

4) 集肤效应与高、低频信号传递的影响。为减少集肤效应的影响，采用"里兹线"结构和智能型结构，这些导线的结构既可有效地减少导线的集肤效应，还可避免由于采用多芯线结构而带来的信号失真等负面影响，尤其值得一提的智能型音响线，它采用高科技手段，对铜线的金属结构进行改变，使导线的外层适合于传输频率为 5kHz 以上的信号，芯线适合于传输频率为 5kHz 以下的信号，高频和低频信号在导线中各行其道，各得其所，以起到传输高、低频具有良好的影响。

1.2 单晶铜及其性能

1.2.1 单晶连铸技术

单晶连铸技术是将定向凝固技术与高效的连铸技术结合起来，实现金属单晶的连续铸造。技术核心是用加热的铸型代替传统连铸采用的冷铸型，见图 3.8-6。热铸型的作用在于使液态金属和凝固铸坯间的固液界面位于型口附近，避免在铸型内部结晶成核，并因铸型和冷却之间悬殊温差产生单向热流，有利于形成定向凝固条件，促进晶粒择优成长，实现单晶铸造。

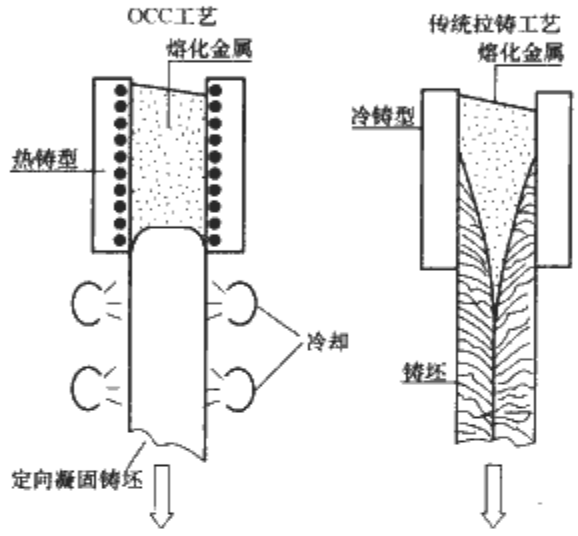


图 3.8-6 单晶连铸(OCC)技术
原理—热型连铸

单晶连铸技术又称 OCC 技术(Ohno Continuous Casting)，是日本 A.Ohno 教授于 1978 年发明，1986 年发表。该项技术的工业应用首先用于生产铝硅合金线坯。随后，日本古河公司与 A.Ohno 教授合作成功开发了用 OCC 法制造的纯铜杆，该法简称为 PCOCC，用于生产单晶铜信号传输线缆。因而 PCOCC 的技术实质就是 OCC 法与无氧铜连铸技术结合的产物，故也简称为 PCOCC—OFC。OCC 优点在于简单、可直接铸型(单晶杆、棒、管等型材)和长度无限。OCC 法除用于纯铜外，还可用于制备单晶连铸镁、铝制品、高硬度铜铝合金焊条、锡-硅合金焊条，硬质合金等。OCC 法看来方法简单，但工艺稳定控制要求高，往往想要的是单个晶粒的"单晶铜"，但得到的是包含 2～3 个甚至还要多一些的"少晶粒铜"或者在连续的铸杆长度上出现"单晶铜"和"少晶粒铜"无规律间隔并存的状态。另外，该法生产速度比较慢，为了提高产量就需要采取多根杆同时引出的措施。

在制造单晶高纯度无氧铜杆时，建立全封闭无污染气氛保护系统，以确保铜的纯度；对铜液进行多道过滤，以减少夹杂，有利拉线；建立可靠的加热控温系统，以获得最佳的铜液过热控制；跟踪控制保温炉液面高度，以保持铜液的稳定流量；确定铜单晶连铸工艺控制系统，以保证整个生产过程实现自动或半自动化，这对优质生产是极为重要的。

20 世纪 90 年代初，我国台湾工研院材料所与万隆电线电缆公司合作研发 OCC 技术，并引进日本古河公司的 PCOCC 生产设备和 Know-How 专利。由于在 OCC 的连铸过程中凝固界面的形状、位置及温度场的分布直接影响到成品的优劣，然而这些凝固参数不易直接测量，因此，材料所

进行了"电脑模拟在 OCC 制程上的应用"工作。此工作乃利用电脑模拟解析来计算该过程的凝固模式，以获知铸件的温度场及金属液流场的分布与变化，再推算各项凝固参数值，由这些结果，可用于评估在过程中各项控制条件对成品的影响，最后获得最佳的条件组合。水平式热型(模)连铸过程如图 3.8-7 所示。

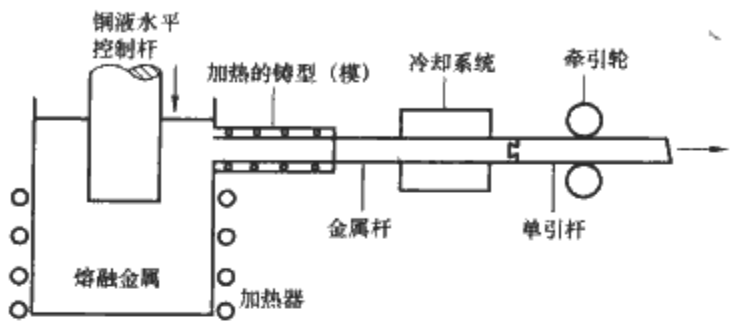


图 3.8-7 PCOCC—OFC 水平式制造过程示意图

国内曾有几所大学研究过单晶铜，2004 年上海大学与上海智诚电讯材料有限公司合作的"单晶连铸技术及单晶铜连铸工艺研制"项目亦已通过技术鉴定；由上海交通大学与郑州电缆(集团)公司合作的国内首条单晶铜生产线已于 2003 年投入生产，生产的单晶铜线主要用于生产音响线。

1.2.2 单晶铜

单晶铜线可以说是无氧铜线的升级换代产品，已成为信息和电力电子器件的基础材料之一，由于它具有频率响应特性好、高导率高、质地致密和塑性变形能力强等优良特性，已广泛地用于高保真的音响线缆、信息传输线缆、半导体封装键合线、高品质电讯接插件、精密电子器件、集成电路基板、IC 卡基带、大功率计算机铜芯片等领域。

单晶铜与普通的低氧铜和无氧铜外观上无任何差别，但是单晶铜与普通铜在晶粒组织上是不同的，前者为单晶，后者为多晶，并且与前述的 LG—OFC 和 LC—OFC 是有区别的，当然应是 PCOCC—OFC 为最好。另外，在材质上(纯度、密度等)也有较大差异。表 3.8-1 是低氧铜、无氧铜和高纯单晶铜材质的比较。图 3.8-8 示出了在扩大试验条件下所获得的 OCC 法凝固组织与普通铜组织的比较，图(a)为在传统连铸工艺条件下普通铜的多晶组织；图(b)为 OCC 法连铸条件下"准单晶铜"的组织，显然还不是纯单晶，实际上是几个大的轴向柱状晶组织，但最理想的应该是单晶组织，这是在不断的实践中希望达到的极品组织。

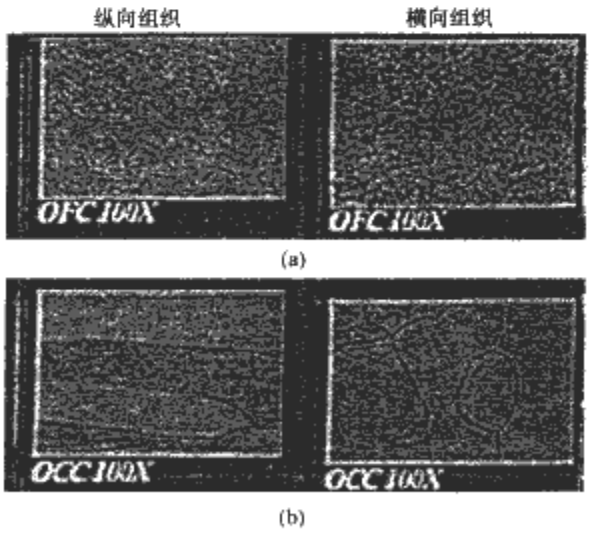


图 3.8-8 OCC 法连铸组织与普通铜连铸组织的比较
(a)普通铜组织；(b)OCC 法铜组织

表 3.8-1 低氧铜、无氧铜和高纯单晶铜的材质比较

材质		一般低氧铜	无氧铜	高纯单晶铜
纯度(%)		>99.9	>99.99	>99.999 7
相对密度		8.75	8.926	8.938
气体杂质 (10^{-6})	O_2	200～500	<10	<5
	H_2	>0.5	<0.5	<0.25
沿轴向平均晶粒尺寸(m)		0.07	0.02	125.00
每米晶粒数/PCS		15 000	50.00	0.008

1.2.3 单晶铜的性能

由于单晶铜特殊的晶粒组织和优良的材质使它具有下列特点和性能：

(1) 消除了传统铜导体晶界对电信号反射和折射导致的信号衰减和变形，可高保真传输，还源音频、视频及数字信号。

(2) 电导率比较高，以 ϕ0.5mm 软线为例，一般在 101.6%IACS 以上。随着纯度、污染水平等的不同，4N 纯以上的电导率可达 105%IACS。

(3) 有良好的加工性能，屈伏强度低，延伸率高。4N 纯 ϕ8.0mm 的单晶铜杆：

1) 抗拉强度(σ_b) 130～140MPa。

2) 屈伏强度($\sigma_{0.2}$) 20～30MPa。

3) 延伸率(δ_{10}) 50%～60%，断口为线状，断面收缩率较高。

4) 含 H 量$<1\times10^{-6}$mL/m^3。

5) 含 O 量$<5\times10^{-6}$mL/m^3。

ϕ8.0mm 单晶铜杆，不经中间退火，可一直拉到 0.1mm 的线径，经退火后可拉出 ϕ0.02mm 的超微细线。正因为单晶铜消除了微细线加工过程中晶界引起的断裂，故有利于深加工制作微细和超微细导线。

(4) 晶铜线具有良好的柔软性，这与它的结晶和纯度有关。

(5) 抗氧化性及耐蚀性优于普通铜。

郑州电缆(集团)公司有关连续铸造单晶铜杆的主要技术参数如表 3.8-2 所示。

表 3.8-2 郑州电缆(集团)公司单晶铜杆技术参数

1. 连铸铜杆的金相组织为 3 个晶粒及以下，单个晶粒占 75%以上	
2. 铜单晶与多晶铸棒比，抗拉强度降低 10%～20%，延伸率增加 50%～80%，断面收缩率增加 200%～300%	
3. 连铸铜单晶与普通连铸铜杆比，电导率提高 2%～10%	
4. 氧含量	小于 5×10^{-6}mL/m^3
5. 氢含量	小于 0.25×10^{-6}mL/m^3
6. 密度	不小于 8.920g/cm^3
7. 平均晶粒尺寸	125m(ϕ0.3mm 以下)
8. 纯度	4N(99.99%)
9. 直径	8mm
10. 长度	8～100m

2 键合线(Bonding Wire)及其在半导体封装上的应用

随着微电子工业的发展，半导体封装用键合线的用量也日益增长。键合线是在键合机上用于连续焊接的导线，而键合机是以导电引线连接芯片焊盘和封装管脚的半导体生产后道工序的关键设备。目前，中国电子科技集团第 45 所已开发出焊速达 14 线/s，每秒可完成 200 多个微米级精度高速三维运动的全自动键合机，并已在国内集成电路企业得到应

用。键合线的种类有金线、金合金线、铜线、铝—1%硅合金线和铝线等。小规格的键合线属超微细线径的范围，而且线径公差的要求都很高，达μm级的线径公差，因此对制线技术有很高的要求。为防止线的氧化(特别是铜线)，每个收线盘都采用在线真空包装，在键合设备上随拆随用。图3.8-9和图3.8-10为引线键合过程和劈刀种类的示意图。键合机将键合线的一端键合到芯片上，将键合线拉起，形成一个桥形拱，同时将拱的另一端键合到基板上；在键合点后将线切断，从而将芯片和基板的电路连接一起，实现引线键合的功能。球键合机采用管状劈刀，多用于键合直径50μm以下的金线；楔键合机采用楔形劈刀，常用于键合直径75～500μm的铝线。

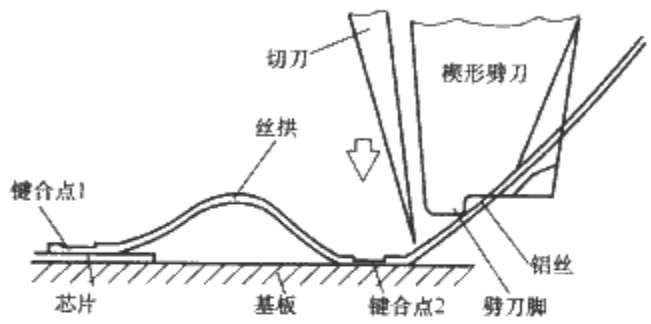


图3.8-9 引线键合过程

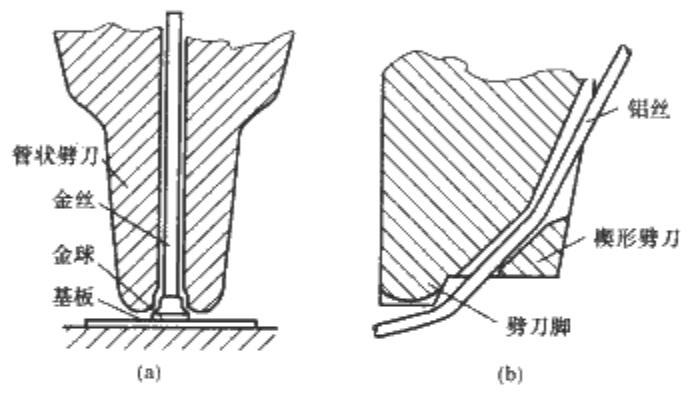


图3.8-10 劈刀的种类
(a)管状劈刀；(b)楔形劈刀

2.1 金键合线

按GB/T 8750—2007规定，半导体器件键合用金线分普通金线和高强度金线，直径0.02～0.05mm。普通金线分硬态(Y)和软态(M)；高强度金线为软态(M)。两者的力学性能分别见表3.8-3和表3.8-4。日本田中电子株式会社GPG型金合金键合线的机、电性能如表3.8-5所示。

根据市场需要，目前超微细金合金键合线的直径已达0.015mm，为了保证高的质量，减少拉线断头，提高产量，降低成本，因此对制线工艺技术的研究是很重要的。图3.8-11示出了IC芯片键合用的直径15μm的金合金键合线。图3.8-12示出了超微细线制造工艺流程。一般超微细金合金键合线的原料为4N或以上的黄金，在金中加入1%钯(pd)或几个添加元素，在高真空充有惰性气体的高频感应加热炉中熔化，铸成柱状锭，然后轧制，先在单头拉线机上拉线和

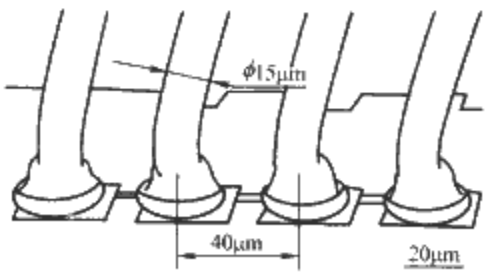


图3.8-11 IC芯片键合用的直径15μm金合金键合线

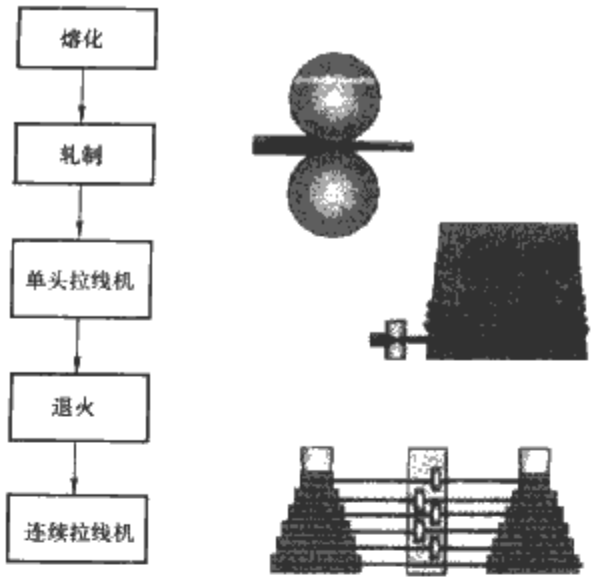


图3.8-12 超微细金合金线制造工艺流程

退火，最后在连续拉线机上拉线，直至线径达20～15μm。连续拉线的条件如表3.8-6所示。

表3.8-3 半导体器件键合用普通金线的力学性能

名义直径(mm)	硬态(Y)		软态(M)		伸长率选择范围	
	拉断力，≥(N)	伸长率δ(%)	拉断力，≥(N)	伸长率δ(%)	Ⅰ级	Ⅱ级
0.020	0.078	0.5～2.0	0.029	2.0～8.0	3	3
0.023	0.127	0.5～2.0	0.049	2.0～8.0	3	3
0.025	0.157	0.5～2.0	0.059	2.0～10.0	3	4
0.030	0.235	0.5～2.0	0.078	2.0～10.0	3	4
0.035	0.306	0.5～2.0	0.108	2.0～10.0	3	5
0.038	0.343	0.5～2.5	0.118	2.0～10.0	4	5
0.040	0.392	0.5～2.5	0.137	3.0～10.0	4	5
0.045	0.498	0.5～2.5	0.176	3.0～12.0	4	6
0.050	0.686	0.5～2.5	0.196	3.0～15.0	4	6

注 伸长率选择范围应在对应于给定直径的伸长率最小值和最大值之间选择，例如直径为0.025mm的金丝，若其伸长率为2.0%～10.0%，伸长率选择范围为Ⅱ级(即4)时，可选择伸长率为2%～6%；3%～7%；4%～8%；5%～9%或6%～10%。

表3.8-4 半导体器件键合用高强度金线的力学性能

名义直径(mm)	拉断力，≥(N)	伸长率δ(%)	伸长率选择范围	
			Ⅰ级	Ⅱ级
0.020	0.049(5.0)	2.0～8.0	3	3
0.023	0.059(6.0)	2.0～10.0	3	3
0.025	0.078(8.0)	2.0～10.0	3	4
0.030	0.108(11.0)	2.0～10.0	3	4
0.035	0.137(14.0)	2.0～10.0	3	5
0.038	0.157(16.0)	2.0～10.0	4	5
0.040	0.176(18.0)	2.0～10.0	4	5
0.042	0.196(20.0)	3.0～12.0	4	6
0.045	0.294(30.0)	3.0～15.0	4	6

注 伸长率选择范围应在对应于给定直径的伸长率最小值和最大值之间选择，例如直径为0.025mm的金丝，若其伸长率为2.0%～10.0%，伸长率选择范围为Ⅱ级(即4)时，可选择伸长率为2%～6%；3%～7%；4%～8%；5%～9%或6%～10%。

表3.8-5 GPG型金合金键合线的机、电性能

型号	线径(μm)	拉断力(mN)	伸长率(%)	电阻(Ω)
GPG	20	79	4.1	0.96
	25	127	4.0	0.61
	30	195	4.3	0.42

注 拉断力试验用UTM—Ⅱ拉力机，试样长100mm，拉力试验速度10mm/min，试验在室温下进行。

表 3.8-6 超微细金合金线连续拉线的条件

每道次减缩率(%)	5～25
模子半角(°)	6～8
拉线应力(MPa)	150～350

2.2 铜键合线

铜键合线与金键合线相比可使半导体器件总的材料价格降低 1/3～1/10，此外，铜键合线具有较高的电导率、导热率和机械强度；也具有较低的金属间化合物生长率［金属间化合物是由铜向极(基)板扩散形成的］，这样在高温环境下具有较高的键合可靠性。在这样的背景下，铜键合线已得到了实际的推广应用。

铜键合线的使用条件不等同于金线，要另加措施。为了键合球(free air ball)的形成需要供给惰性气体，以防氧化；生产空间的湿度应保持小于 60%，以防止线表面因潮气引起的腐蚀；生产空间应是超净的尽可能减少灰尘，以防止在毛细孔中积累的潮气所引起的局部腐蚀。图 3.8-13 示出了在键合阶段的温度与氧化膜厚度的关系，铜受到氧化而生成的 Cu_2O 膜在室温下是薄而致密的，但快速生成的 CuO 膜，如图所示在高温环境下按抛物线规律增厚，则比较厚。为了解决这些问题要考虑铜的纯度或合金化，使键合球的硬度比较软，以避免芯片开裂；为了防止键合球氧化应使用氩气或氮气+5%～10%氢气加以保护；要保持线和焊接表面的清洁，以改善线键合器在第 2 键合上的键合条件；改变极板技术，由铝基转向铜基，这样在同种金属间没有金属间化合物形成，可改善耐热的可靠性，并且可减少电化腐蚀，以改善耐蚀可靠性；由于同种金属间没有接触电位的不同，可改善 AC 的时钟脉冲率(Clock rate)。

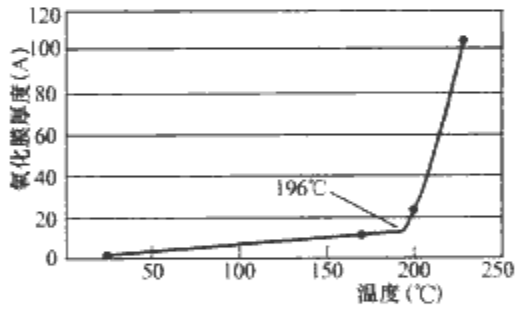


图 3.8-13 在键合阶段的温度与氧化膜厚度的关系

田中电子工业株式会社开发的 TOCW(99.9%Cu)和 TPCW(99.99%Cu)两个型号的铜键合线，前者的特点是在任何环境下可形成稳定的键合球、有稳定的第 1 键合和较高的机械性能。后者的特点是可防止芯片开裂、有稳定的第 2 键合和较高的电导率。图 3.8-14 示出了 TOCW 型、TPCW 型和 4N 金键合线拉断力与伸长率的关系；图 3.8-15 为电阻率比较；图 3.8-16 为 TOCW 型与高强度 4N 金键合线抗拉强度与伸长率关系的比较。TOCW 和 TPCW 型铜键合线的公司标准如表 3.8-7 和表 3.8-8 所示。据日本能源 Acrotec 报导 6N 纯的铜属于 LC—OFC 无氧铜，由于其柔软性似金线一样，故亦适于制造铜键合线，用以代替金键合线。

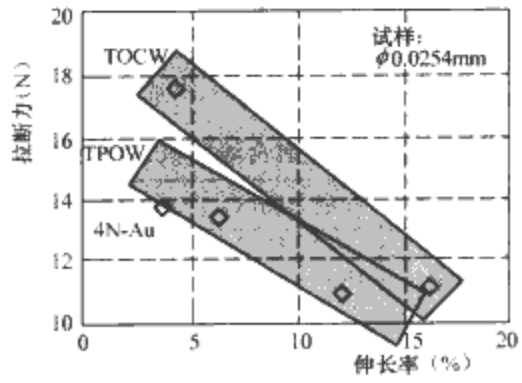


图 3.8-14 TOCW、TPCW 铜键合线和 4N—金键合线拉断力与伸长率的关系

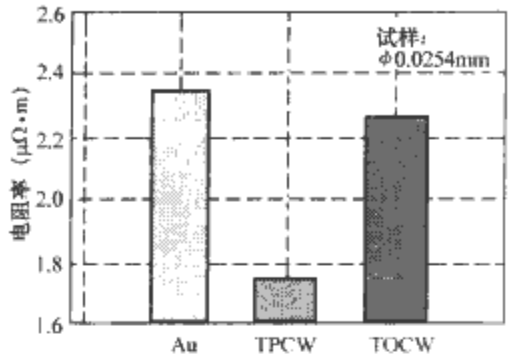


图 3.8-15 TOCW、TPCW 铜键合线和金键合线电阻率的比较

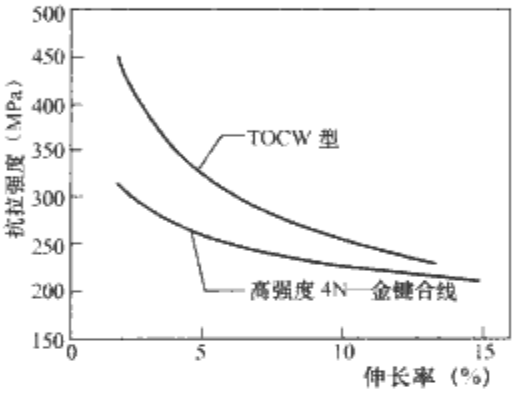


图 3.8-16 TOCW 铜键合线和高强度 4N—金键合线抗拉强度与伸长率的关系

表 3.8-7 TOCW 型铜键合线标准

直 径 (μm)	直径公差 (μm)	重 量 (mg/200mm)	伸长率，最小 (%)
20	±1	0.51～0.62	5
25	±1	0.81～0.95	6
30	±1	1.15～1.38	7
32	±1	1.30～1.57	7
38	±2	1.87～2.18	8
50	±2	3.27～3.75	12

注 拉断力试验用 UTM—Ⅱ拉力机，试样长 100mm，拉力试验速度 10mm/min。

表 3.8-8 TPCW 型铜键合线标准(暂定)

线径(μm)	伸长率(%)
20	5～15
25	6～18
38	8～20
50	10～20
75	10～20
100	10～20

2.3 铝—1%硅合金键合线

铝—1%硅合金键合线应具有硅均匀分布(见图 3.8-17)、稳定的机械性能和在均匀一致的线上没有毛刺、污物和表面裂纹。田中公司 TABW 型铝—1%硅合金键合线机械性能如表 3.8-9 所示。

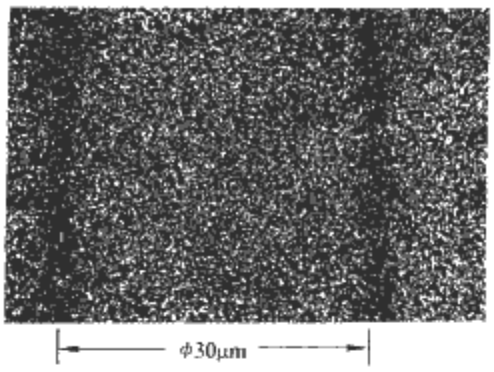


图 3.8-17 φ0.03mm 铝—1%硅
键合线的金相图

表 3.8-9 TABW 型铝—1%硅合金键合线机械性能

型号		线径和公差 (μm)	单位质量 (mg/200mm)	拉断力 (mN)	伸长率 (%)
TABW	—18—H	18±1	0.12～0.15	74～83	0.5～4.5
	—18—SR	18±1	0.12～0.15	66～74	0.5～4.5
	—20—H	20±1	0.15～0.19	88～108	0.5～4.5
	—20—SR	20±1	0.15～0.19	78～98	0.5～4.5
	—25—H	25±1	0.24～0.29	147～167	0.5～4.5
	—25—SR	25±1	0.24～0.29	127～147	0.5～4.5
	—30—H	30±1	0.36～0.41	206～226	0.5～4.5
	—30—SR	30±1	0.36～0.41	167～186	0.5～4.5
	—32—H	32±1	0.41～0.46	206～226	0.5～4.5
	—32—SR	32±1	0.41～0.46	186～206	0.5～4.5
	—35—H	35±1	0.49～0.55	284～314	0.5～5
	—35—SR	35±1	0.49～0.55	255～284	0.5～5
	—38—H	38±1	0.58～0.64	333～363	0.5～5
	—38—SR	38±1	0.58～0.64	304～333	0.5～5
	—40—H	40±2	0.61～0.75	373～412	0.5～5
	—40—SR	40±2	0.61～0.75	333～373	0.5～5
	—50—H	50±2	0.98～1.15	588～647	0.5～6
	—50—SR	50±2	0.98～1.15	461～520	0.5～6
	—80—SR	80±3	2.51～2.92	1257～1471	0.5～6

注 1. H—硬态型；SR—应力释放型。
2. 机械性能试验条件：拉力机 UTM—Ⅱ，试样长 100mm，拉力试验速度：2～10mm/min。

2.4 大功率器件封装用铝键合线

铝键合线用于大功率器件的封装，应具有优秀的耐腐性能(见图 3.8-18)，能在通常的键合条件下进行键合，从性能分，它有三种型号，即硬态、软—1 态和软—2 态。铝键合线的机械性能如表 3.8-10 所示，它的硬度和电阻率如表 3.8-11 所示。

线的型号 \ PCT 腐蚀试验	20h	90h	700h
TANW			

图 3.8-18 TANW 型铝键合线 PCT 腐蚀
试验后的横截面金相图
[试验条件：121℃，100%RH，2atm(2065.5hpa)]

表 3.8-10 TANW 型铝键合线机械性能

型号	线径和公差 (μm)		软—1 态 拉断力 (N)	软—1 态 伸长率 (%)	软—2 态 拉断力 (N)	软—2 态 伸长率 (%)
TANW	100±5	4.0±0.2	0.49～0.78	10～30	0.34～0.54	5～25
	125±5	5.0±0.2	0.69～1.18	10～30	0.54～0.78	5～25
	150±5	6.0±0.2	0.98～1.96	10～30	0.78～1.18	5～25
	175±5	7.0±0.3	1.37～2.35	10～30	1.03～1.47	5～25
	200±7	8.0±0.3	1.96～2.94	15～40	1.37～1.96	9～25
	250±7	10.0±0.3	2.94～4.41	15～40	2.06～2.94	10～30
	300±7	12.0±0.3	3.92～5.88	15～40	2.94～4.12	10～30
	350±7	14.0±0.3	5.59～9.41	15～40	4.41～5.39	10～30
	380±7	15.0±0.3	7.35～10.79	15～40	4.90～6.86	10～30
	400±7	16.0±0.3	7.35～12.26	15～40	5.39～7.35	10～30
	450±7	18.0±0.3	9.32～15.49	15～40	6.86～8.34	10～30
	500±10	20.0±0.4	11.47～18.63	15～40	7.85～10.79	10～30

注 试验条件：拉力试验机 UTM—Ⅱ，试样长：100mm，拉力试验速度：2～20mm/min。

表 3.8-11 TANW 型铝键合线的硬度和电阻率

性能 \ 型号		TANW 软—1 态	TANW 软—2 态	TANW
硬度 (HV)	最小～最大	23.1～25.0	22.3～24.5	—
	平均	24.2	23.4	—
电阻率($\times10^{-6}\Omega\cdot$cm)		—	—	2.7

注 显微硬度试验机(负荷：0.49N，30s)。

3 新一代玻璃膜微细磁性线和导电线及它们的应用

玻璃膜微细线自 20 世纪 50 年代末从原苏联传入中国以来，我国上海电缆研究所，还有英国、日本、美国、西德等国主要研究、生产的是铜、银、锰铜、金、铌、铝等玻璃膜微细线，此外，也研制了一些其他的金属和合金(如铝铁合金)为线芯的微细线和微同轴导电线。1999 年来自前苏联的

以色列移民组建的“现代金属技术公司”与“全球线材集团公司”联合组建了“现代微细线制造公司”，该公司非但可用这种技术制造铜、银和金这样的可导电的微细线，并且也生产出了符合工业标准的非晶金属合金微细线，这种玻璃膜微细线直径从 2μm 到 150μm，具有独特的磁性，由此扩展了新的应用。图 3.8-19 为现代微细线制造公司的全自动和受控的微细线生产装备。玻璃膜微细线的玻璃膜绝缘层可用氢氟酸除去，因此开创了制取不被酸碱腐蚀的裸的微细金属线的新方法。

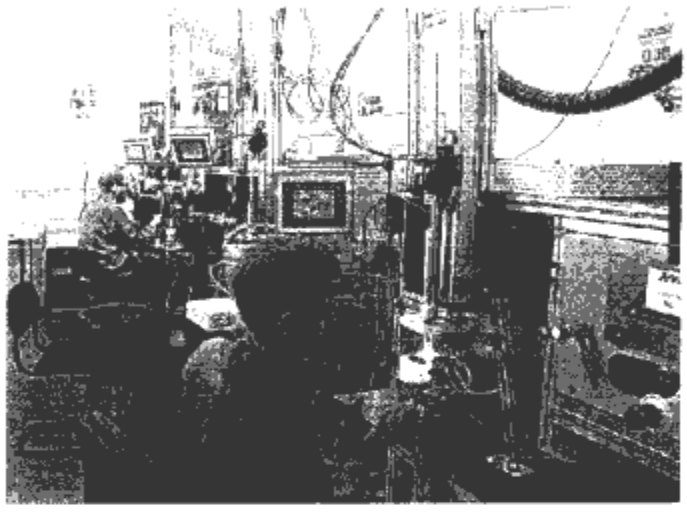


图 3.8-19 现代微细制造公司的全自动和受控的微细线生产装备

3.1 玻璃膜微细线制造工艺

图 3.8-20 为玻璃膜微细线制造的示意图。玻璃膜微细线的制造工艺是利用高频感应电流，加热旋转着的玻璃管内的金属，金属熔化后湿润玻璃，把热量传递给玻璃致使其软化。此时，金属在磁场力作用下不会从软化玻璃管下端漏出。当在玻璃管底部用一引针迅速引下软化玻璃液时(与拉制玻璃纤维相类似)，玻璃液呈毛细管状被引出，并立即将其绕在高速旋转着的收线盘上；由于玻璃毛细管的负压使熔化的金属灌满在毛细管内；用水、油或空气冷却毛细管，就成了外包玻璃绝缘层的微细金属线。因这种制造方法无须模具，故又称“无模拉丝法”。只要适当控制调整玻璃尺寸、玻璃管和金属的补充量、熔化金属的位置和温度、导线的收线速度以及冷却的速度与位置，就可获得不同规格的微细线。

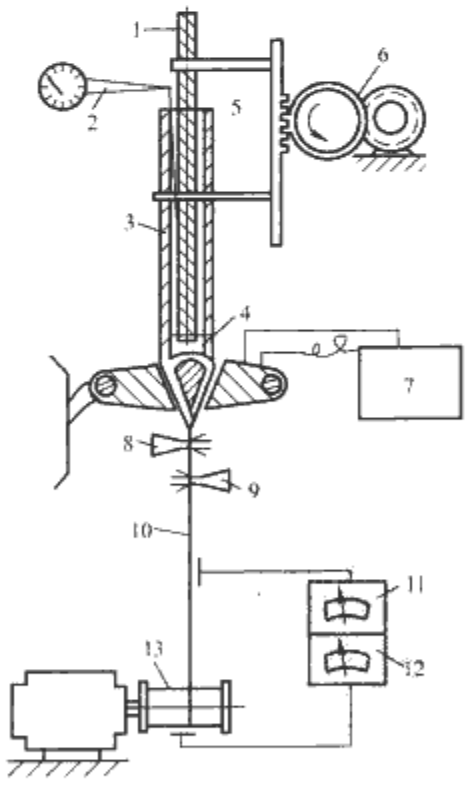


图 3.8-20 玻璃膜微细线制造示意图

1—金属杆材；2—热电偶；3—玻璃管；4—熔剂复盖层；5—氩气入口；6—供料机构；7—高频发生器；8—空气冷却；9—水冷却；10—微细线；11—断线指示器；12—电子式长度测量装置；13—收线盘

3.2 玻璃膜微细线的特点

由于玻璃膜微细线具有线径小、耐高温、阻值大等特点，所以随着电子工业向小型化、微型化的方向发展，使玻璃膜微细线的研究和应用获得了进一步的发展。在这种小型和微型化技术中有许多元器件要求使用非常细的微细和超微细线，但若使用通常的拉线技术就不能把线径减小到某一极限值以下，例如铜线的最小直径不能小于 9～10μm，对要求拉出有磁性的微细线那就更加困难了。采用微细线对元器件的体积、重量和性能效果是十分明显的。例如：对微型变压器和继电器，采用了微细导线以后，其尺寸仅为一般的 1/10，甚至可减小到 0.1%。检流计线圈中以直径为 6μm 的玻璃膜微细铜线代替标准的 φ0.20mm 的漆包铜线时，在不增加重量的情况下，绕组匝数可增加 10 倍，灵敏度就相应提高；当以 2.5μm 线绕制时，灵敏度提高达 10 倍以上。对于线绕电阻在相同阻值时，若导线直径减小到 1/10，则元件重量可减轻到原来的 1/10 000，故采用微细导线绕制电阻元件可大大缩小体积和减轻重量，并可绕制出 100MΩ 以上的线绕电阻元件；采用高稳定、低电阻温度系数的微细锰铜线可绕制标准高阻器。在医学上将玻璃膜微细金线用作神经细胞微电流测量的引接线；用某种微细线可制作高灵敏度的温度测量元件——热敏电阻线、微型热电偶对。目前玻璃膜微细或超微细线的生产技术已允许达到下列要求：

(1) 总直径非常均匀，直径公差小于 2μm，金属芯最小直径 0.5μm、最大直径 150μm，金属芯直径十分稳定，其公差小于 10%。

(2) 线的长度实际上是无限的。

(3) 生产过程可实现完全自动和受控，采用在线记录微细线的直径。

(4) 生产过程非常稳定，装备可连续运行若干小时。

3.3 玻璃膜微细和超微细线的应用

3.3.1 微细线作为导(电)线的应用

玻璃绝缘微细线不仅可认为是通常的 10μm 以下超微细导线的延伸，而且也应认为是一种新的材料，因而，这种新材料可产生新的应用。作导线用的微细线具有下列性能：

(1) 总直径 5μm 的超微细线是容易达到的。

(2) 如果需要，可制作厚的玻璃膜。

(3) 有非常高的介质强度：20 000V 或以上。

(4) 玻璃绝缘的介质强度：击穿电压比传统的电磁线高 5～7 倍。

(5) 玻璃膜微细线能保持它绝缘性能的温度为 500～700℃，而一般聚合物绝缘的普通线不超过 100～150℃。

(6) 能承受的最小弯曲直径：玻璃膜微细线总外径的 40～200倍。

鉴于上列性能已获得了实际的应用，特别是，在通信用微型电缆及小型高压变压器上的应用。10μm 以下的超微细银线可用作高频传输的导线。

3.3.2 微细线作为软磁性线的应用

近15～20年来，非晶金属合金已有不同的工业应用，这是由于它具有独特的磁性所致。之所以有独特的磁性，是由于它的微观结构造成的。这些材料已成功地用于代替通常的软磁(性)材料。用上述的制造技术允许在线径为2～150μm范围内制造非晶材料。非晶玻璃膜包的微细线可呈现出独特的机、电和磁性能。基于钴、镍和铁的非晶微细线呈现出极高的磁性能，对它们的使用优于α铁(铁淦氧)和非晶带。这使得这些材料适于在高频范围从10MHz到约几个GHz使用。细的非晶微细线其独特的高频性能，允许AMT去开发通信用的新一代小型磁性元件。特别在通信器件的小型化中需要开发平面的(两维的)DC—DC转换器、磁放大器和其他的电力电子元件，在达到5MHz及更高的频率下运行。它亦意味着感应器元件也必定会易于集成进入微型制造技术。试验研究表明：对小型感应元件的制造，非晶玻璃膜包的微细线与α铁、非晶带和薄的磁膜相比具有许多优点。它允许扩展操作频率范围和减少磁的和邻近的损耗。基于采用微细线的磁性元件就能容易地被集成进入微型制造技术。

玻璃膜包的非晶微细线在0.1～2GHz的频率范围内对屏蔽和噪声抑制是一种非常有希望的材料。它能达到有效的吸收，如果磁性材料磁性各向异性的取向相对于电磁场的矢量有一个适当的数值和取向。据现在的研究显示微细线的磁性各向异性是可在制造过程被严格地控制的。随着合金成分和线径的不同，内部的(固有的)磁性各向异性的磁场处于非常宽的范围(10～5000A/m)。这就有可能产生一种沿着轴向和垂直轴向磁化的微细线。由此，已经开发了使微细线纤维具有不同取向的组成材料的制备方法，从而使得可以控制这些材料中磁性各向异性的空间分布。

3.3.3 微细线在安全方面的应用

微细线在安全方面的应用有很大的潜力：

(1) 在防盗标记元件中的应用。“现代微细线制造公司”制造的第一个非晶微细线产品就用在EA系统的防盗标记元件中，它的效果明显优于非晶带，而这种非晶带在近10多年来已使于类似的产品中。

(2) 在产品和文件鉴别、商标保护和选择(存取、入口磁卡等)控制中的应用。

(3) 在埋入安全纸(如纸币等)中的应用。

(4) 在全息照相技术中的应用。现在用于防假最普遍的技术是全息照相技术，但与此同时，随着全息照相防护技术的改进，全息照相自身的假冒也在增长。从全息防假方法的开发者与伪造者处很容易地获得全息照相技术就说明了这点。如果在使用全息照相技术的同时使用磁性微细线，那似乎是更有希望的解决办法。

(5) 在磁性编码系统中的应用。“现代编码系统(LTD)公司”正在开发和市场化磁性玻璃包微细线的独特应用，在这独特的应用中允许使用一个专用的读数器将编码的磁性签名(特征图形)解码。

(6) 在不同型式的磁性感应器上的应用。

(7) 在自备电源设备节能上的应用。自备电源设备的节能是一个重要的问题。由磁性微细线做的任何磁芯，与其他任一材料相比具有非常低的能耗(由涡流产生的能耗)，这是因为它有极高的电阻和包有玻璃的绝缘，由此，在微细线之间可避免任何电的接触，而且这种微细线是非常柔软的，它几乎可做成任何形状而不受限制，并不会从此失去磁性能。

3.3.4 玻璃膜微细线在其他方面的应用

做成微细线型式的许多合金[金属或半—金属(Semi-metals)]具有独特的性能，它可用于医学、化学、新开发的复合材料和其他方面。

3.4 新一代玻璃膜微细线的开发和应用正在继续

随着玻璃膜微细线组成材料和芯径/线径比的不同，玻璃膜微细线将会具有独特的性能。例如：“Pyrex”玻璃与铜基合金(如$Cu_{70}Fe_{30}$、$Cu_{80}CO_2$等)、$Fe_{75}Si_{10}B_{15}$、$CO_{75}Si_{10}B_{15}$、$Fe_{71.8}Cu_{1.0}Nb_{3.1}Si_{15}B_{9.1}$、$(Fe_{0.06}CO_{0.94})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$等。材料的结晶除非晶外，在尺寸上还可以是纳米晶。

据近5年的研究可以看出：

(1) 玻璃膜铜基合金微细线中微观结构呈现αFe和CO相与Cu共存，纳米晶粒尺寸为40nm；影响微细线中αFe和CO相含量不同的关键是制造条件(用参数芯径/线径之比表示)；影响微细线磁特性和结构的关键亦是制造条件。

(2) 研究非晶玻璃膜Fe—Si—B、CO—Si—B微细线的磁性能、机械性能、组织及其转变表明：由于玻璃和金属具有不同的膨胀系数，当凝固时会产生高的应力梯度，这些因素会影响局部的有序组织、非晶微细线的机械特性和扩散特性。在加热条件下，特定的几何尺寸(芯径/线径比)和芯线的应力状态明显影响机械性能和它们的变化。在最小的芯径下，微细线的强度可提高3～4倍。在600～850℃的温度范围内，微细线呈现超塑性的行为，例如CO-Si-B和Ni-Si-B试样，其变形率ε_{max}分别达到350%和850%，图3.8-21示出了Ni-Si-B和CO-Si-B非晶玻璃膜微细线ε_{max}与芯径(d_c)/线径(D)的关系。由此可以看出：尺寸效果、应力状态、金属-玻璃界面的存在都影响玻璃膜微细线的性能；微细线的尺寸、温度和成分决定了整根线和芯线的性能和组织。在同一成分下，对应不同的芯径，有它自己的非晶金属相、结晶状态的转变、居里点和超塑性特征。也即对已知的成分，取决于芯径和非晶的数量；在成分一致的条件下，芯径减小可增加微细线芯非晶相的热稳定性、结晶温度和居里点增量；在芯径超过某一临界值下，对每个合金，两相、非晶和晶体的特征都同时存在于芯内；当温度接近临界温度时，金属和玻璃的界面上产生一种特殊的转变层，其厚度约为100nm以下。在金属-玻璃边界中，逐渐发生转变，从不规则的金属玻璃结构转变成不规则的硅酸盐玻璃结构。玻璃膜微细线的超塑性的发现亦可说明已涉及了金属-界面的概念；非晶微细线性能的形成与各向异性、机械强度、成分和磁致伸缩有关。

(3) 非晶和纳米晶磁性材料在玻璃膜微细线中的应用具有很大的潜力。为了应用寻找合适的材料是非常重要的，因

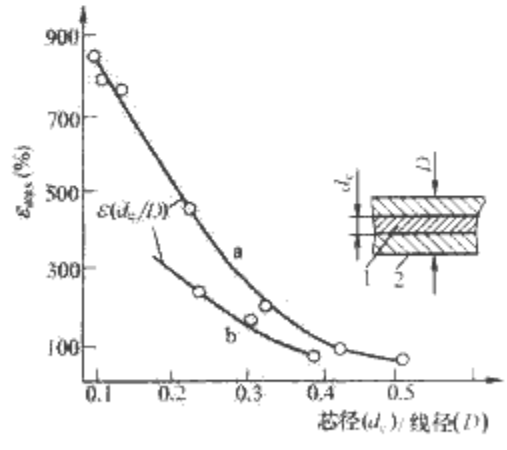


图3.8-21 Ni—Si—B(a)和CO—Si—B(b)非晶玻璃膜微细线ε_{max}与芯径(d_c)/线径(D)的关系

1—金属芯；2—玻璃膜

为不同的材料具有不同的各向异性场、磁致伸缩常数、起始磁化率或转换场。例如，磁性材料 FeSiBCuNb、FeSiB，添加 Cu 和 Nb 的特软磁磁致伸缩材料 $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Cu_1Nb_3$，无磁致伸缩软磁材料 $(Fe_{0.06}CO_{0.94})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$，纳米晶磁性材料 $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Cu_1Nb_3$。利用不同材料突出的磁柔软和有利的特性，如几乎零磁致伸缩合金的频率响应使得非晶材料在磁芯和电子器件中应用是理想的。高磁致伸缩的合金可在监测应力中用作优良的传感元件。非晶合金都用作磁场监测器、内编码器件和内防盗系统。纳米晶磁性材料亦已打开了可能的广阔范围。

(4) 金属芯直径 1～20μm、玻璃膜厚度 1～10μm 的非晶和纳米晶铁磁金属微细线具有突出的磁性能-磁双稳定性、磁柔软性和 GMI 效应(达 130%)。除材料成分、玻璃膜微细线制造工艺[芯径(d_c)/线径比(D)]影响线的磁性能外，再磁化过程也影响线的磁性能。

参 考 文 献

[1] 上海电缆研究所. 电线电缆产品手册. 第1版. 北京：机械工业出版社，2005.

[2] 王春江主编. 电线电缆手册. 第2版. 北京：机械工业出版社，2002.

[3] JB/T 8999—1999. 光纤复合架空地线.

[4] 邱波峡，应鸿. 新型缓蚀剂1—羟基苯骈三氮唑在防腐蚀中的应用. 材料保护，2000(6)：30-31.

[5] 周晓蔚，范洪波. 氧化性杀生剂对铜缓蚀剂影响的试验研究. 材料保护，2000(7)：1-2，46.

[6] 谢洪波等. 铜及铜合金低温快速无铬钝化工艺研究. 材料保护，2005(1)：37-39.

[7] 来长妹. 铜带变色的原因及抑制方法. 上海有色金属，2002(3)：115-117，124.

[8] 欧迪恒. 再论橡套软线铜线发黑的解决办法. 电线电缆，2006(2)：20-22.

[9] 何俊等. 铜缓蚀剂的研究现状与进展. 材料保护，2006(4)：42-47.

[10] 陈瑜等. 苯骈三氮唑及其羧基烷基酯衍生物缓蚀性能的量子化学研究. 材料保护，2006(7)：4-8.

[11] 于萍，魏云鹤等. 表面不均匀性黑膜钢芯铝绞线耐蚀性能对比及可用性研究. 电线电缆，2004(2)：10-13.

[12] ASTM B 802/B802M-02. Standard specification for zinc 5% Aluminum-Mischmetal Alloy-Coated steel core wire for Aluminum Conductors, Steet Reinforced (ACSR).

[13] ASTM B803-02. standard specification for High strength Zinc-5% Aluminum-Mischmetal Alloy-Coated steel core wire for Aluminum and Aluminum Alloy Conductors, Steel Reinforced.

[14] ASTM A855/A855M-98. Standard specification for Zine 5% Aluminum-Mischmetal Alloy-Coated Steet Wire Stand.

[15] ASTM A925-98. standard specification for Zinc-5% Aluminum-Mischmetal Alloy-Coated steel overhead Ground wire stand.

[16] ASTM B750-99. Standard specification for Zinc-5% Aluminum-Mischmetal Alloy in ingot form for Hot-Dip Coating.

[17] 胡小华等. 输电线路防覆冰涂料的研究进展. 材料保护，2006(3)：36-38.

[18] Vapor-Tek Limited，黄崇祺译. 架空导线的防腐剂及其使用方法. 电缆金属文集. 上海电缆研究所出版，2001年，131-139.

[19] 浅野佑二等，奚仲波译. 架空电线用特殊防腐剂. 国外电线电缆(原刊：日"藤仓电线技报"，2004第106期)，2005(2)：24-27.

[20] 李学俊. 架空导线防腐涂料的配方选择及配制工艺. 电线电缆，1997(3)：22-25.

[21] BS EN 50326：2002. Conductor for overhead lines-Characteristics of greases.

[22] BS EN 50182：2001. Conductors for overhead lines-Round Wire Concentric lay stranded Conductors.

[23] 新疆众和股份有限公司. 精铝产品样本，2005.

[24] 王祝堂. 世界高纯铝的生产、市场与应用. 有色金属加工，2004(6)：1-7.

[25] Satoshi sugimaru 等. Development of Zn-11% Al-2% Mg Coated steel wire with excellent corrosion resistance and formability. wire journal international，2004(7)：60-64.

[26] 李焰. Zn-Al-Mg-RE 合金镀层钢丝的研制。材料保护，2001(8)：27-28.

[27] 刘伯宁主编. 电工材料应用手册. 北京：机械工业出版社.

[28] 丁雨田，李来军等. 接触线材料的现状及研究热点. 电线电缆，2004(2)：3-9.

[29] 彭立明，毛协民，温宏权. 凝固工艺对自生复合 Cu-Cr 合金电车线综合性能的影响. 功能材料，2001，32(2)：159-160.

[30] 上海电线一厂. 防铜线发黑工艺简介. 电线电缆，1982(1)：58.

[31] GB/T 20492—2006. 锌－5%铝—混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线.

[32] 李芳华. 防腐钢芯铝绞线的研制. 电线电缆，1983(6)：6-9.

[33] H. Nomura. 螺线管磁体用一种新的稳定化超导体的结构. Cryogenic，1971(10)：396-401.

[34] S. Shimamoto，H. Nomura. 一种新的铝稳定化超导线，Cryogenic，1971(8)：303-304.

[35] 上海市电器科学研究所. 国外超导电技术. 上海科学技术情报研究所出版，1982.

[36] 姜训勇，李忆莲，王童. 高强度高导电铜合金. 上海有色金属，1995(5)：284-288.

[37] Lei Lu，Yongfengshen. Ultrahigh strength and High Electrical Conductivity in cu. Science，Vol304，2004(4)：422-26.

[38] Joseph Meseha. Comparison of Competing Continuous Casting Processes. Wire journal international. 2005(3)：185-193.

[39] 黄伯云，李成功等. 中国材料工程大典. 北京：化学工业出版社，2006.

[40] Tahir Zaheer. Possible solutions to low twist quality in copper rod. Wire industry，2000(8)：542-545.

[41] Jacques Adam，Carilos sanchez. Improvement in rod manufacturing technology to meet the increasing quality requirement of the wire industry，wire journal international，2000(11)：102-106.

[42] 黄崇祺. 铜、铝导体生产的发展趋向及有关问题的研讨. 2003年导体与装备技术研讨会论文集

[43] 黄崇祺. 中国电缆工业对制铜、制杆和制线的四大关注. 中国铜业，2005(1)：20-30.

[44] RON Adams(美国南方线材公司)，沈家刚(译)，黄崇祺(校). 铜杆连铸连轧铸条(坯)的质量基础，技术资料，上海电缆研究所，2004.

[45] Sharonk，Young. What's in cathode? other than copper，that is? wire journal international，2000(7)：98-102.

[46] 廖乐杰，周平，张钊. 稀土添加剂在铜及铜合金中的应用与展望. 上海有色金属，1998(3)：132-135.

[47] 廖乐杰，袁江. 稀土铜细化剂及其生产. CN 1148096(A)，1997.

[48] 张劭. 紫铜熔铸工艺中的吸气的思考. 上海有色金属，1998(9)：117-120.
[49] 林河成. 金属铈材料的生产及应用. 四川稀土，2005(1)：8-10.
[50] 三菱电线工业. 电线要览，1166，1170.
[51] Contirod 公司 . Contirod® and its Selection for special applications. Wire industry，1994(6)：383-384.
[52] 李耀群，林群，汪建华. 铜线杆新一轮扩能成为铜材生产新热点. 世界有色金属，2006(4)：23-24.
[53] Gary Spence and John Hugens. Copper Shaft furnace melting and Charging：a new approach. Wire journal international，2005(4)：110-115.
[54] 汪济川. 浅谈提高无氧铜铸杆质量的几种方法. 电线电缆，2001(6)：47-48.
[55] Outokumpu Upcast. wire and cable technology，2004(12/11)：32.
[56] 黄崇祺. 中国电缆工业现状及发展趋势. 2004 年中国国际铜业论坛(论文集)，2004，10.
[57] 上海电缆研究所. 中国铜消费量近 1/3 来自废杂铜. 线缆行业经理参考，2005(5)：13-14.
[58] 兰兴华. 高速鉴别有色金属废料和分类. 有色金属再生与利用，2005(10)：32-33.
[59] 东方电工. 新型废铜连铸连轧机组. Wire and cable ASIA，2000(11/12)：17.
[60] 毛照东. 废铜资源对浙江铜加工产业的影响. 有色金属再生与利用，2006(2)：25-26.
[61] 宋善明. 再生有色金属利用与节能. 世界有色金属，2006(3)：21-23.
[62] 和晓燕. 铜线杆质量影响因素浅谈. 有色金属再生与利用，2005(12)：13-15.
[63] 澎博. 广东电缆最危险八成产品不合格. 有色金属再生与利用，2006(4)：46.
[64] 石裕. 利用杂铜直接生产纯铜产品的技术—FRHC 法杂铜精炼工艺及应用. 电线电缆，2001(4)：6-7.
[65] 陈一胜，李勇. 利用废旧紫铜生产上引铸造无氧铜杆的研究. 电线电缆，2004(1)：30-32.
[66] 阎利，刘应宗，黄文雄. 废旧家用电器的机械破碎与分选技术. 中国工程科学，2005(12)：24-30.
[67] ASTM B279-04. Standard Test Method for stiffness of Bare Soft square and Rectangular Copper and Aluminum wire for Magnet Wire Fabrication.
[68] ISO Technical Report 4745. High Conductivity Copper—Spiral elongation test.
[69] ISO 2626—1995. Copper Hydrogen embrittlement test.
[70] ISO 2624—1995. Copper and copper alloys—Estimation of average grain size.
[71] ISO 196—1995. Wrought Copper and copper alloys—Detection of residual stress—Mercury (I) nitrate test.
[72] ISO 4746. Oxygen—free Copper—Scale adhesion test.
[73] 中国电器工业协会电线电缆分会绕组线专业委员会. 绕组线用铜工艺技术研讨会论文集，2001：24-28、36-39、51-54、63-73.
[74] 张咏生. 滑动式拉线机拉伸过程中断线分析. 电线电缆，2001(3)：45-46.
[75] 上海电缆研究所. 电磁线产业技术发展趋势和需求分析. 电线电缆行业通讯，2005(8)：4.
[76] Rene Garza—Garcia. Application of microscope techniques in the magnet wire industry. wire journal international，2005(6)：48-51.
[77] 郭文涛. 几种扁线机械性能的评价方法. 电线电缆行业信息资料服务网专题文选，2002(6)：4-6.
[78] 汤菲. 无氧铜杆在漆包线生产中的应用. 中国电器工业协会电线电缆分会绕组线专业委员会绕组线用铜工艺技术研讨会文集，2001：9-16.
[79] 林年福. 退火工艺对漆包线质量的影响. 中国电器工业协会电线电缆分会绕组线专业委员会绕组线用铜工艺技术研讨会文集，2001：第 29-35.
[80] Michael Quinn. optimization of drawing lubricant performance in copper wiredrawing Systems. wire journal international，2006(8)：67-69.
[81] 上海电缆研究所信息中心. 浙江逾六成电线电缆不合格. 电线电缆信息，2006(4)：31-32.
[82] 王丽新. 铜拉丝润滑液的研制. 材料保护，2006(6)：35-37.
[83] Michael J. McNulty. Trends in the nonferrous wire industry. wire journal international，2000 (10)：110-115.
[84] 刘中亮. 拉线机的新发展. 绕组线用铜工艺技术研讨会文集，中国电器工业协会电线电缆分会绕组线专业委员会，2001：47-50.
[85] 张杰. 再谈拉线机的新发展. 电线电缆，2003(6)：11-14.
[86] 朝日金属精工株式会社. BUS—DUCT 产品样本 .
[87] BWE Ltd—UK. 创新 Conform 系列“感应加热器”适合铜挤出。Wire and Cable AsiA，2005(3/4)：53.
[88] 宋宝韫，樊志新，刘元文. 应用连续挤压技术生产铜扁线. 电线电缆，2001(1)：17-18.
[89] 沈耀平，王常余. 国产母线槽现状及应注意的问题. 电世界，2002(12)：4-8.
[90] 江阴市电工合金有限公司. 产品介绍，2005 年
[91] 无锡环宇电磁线有限公司. 5～63 根导线集束换位导线设备正式投产. 电线电缆行业简讯，2001：13.
[92] 黄崇祺. 接触导线制造新工艺及有关问题研讨. 电线电缆，2005(6)：6-7.
[93] 江铜集团铜材公司，江西理工大学. 铜铝复合接触线研制成功. 电线电缆报，2006，8
[94] 牛玉英等. 银铜合金接触线新工艺的研究. 中国铁道科学，2005(3)：99-103.
[95] GB/T 467—1997 阴极铜国家标准 .
[96] GB/T 468—1997 电工用铜线锭 .
[97] 王祝堂，田荣璋 . 铜合金及其加工手册. 中南大学出版 .
[98] E. Henry chia. Copper rod and cathode quality as affected by hydrogen and organic additives wire journal international，1992(11)：67-75.
[99] Karel Feyaerts. The effects of impurities on the recrystallization behavior of tough-pitch hot rolled copper rod. wire journal international，1996(11)：68-76.
[100] Horace pops，James Holloman. Effects of axygen Concentration on the recrystallization behavior of Copper wire. wire journal international，1994(5)：70-83.

[101] 刘维杰. 浸涂法生产铜杆的冶金特性. 电线电缆，1986(3)：37-39.
[102] 钱淑英(译). 稀土金属对导电铜性能的影响. Металло Ведение Термичсекаяобработка Металлов，1979(3)：41-44.
[103] 崔锡陶，侯济宇. 稀土在铜及铜合金中的应用. 有色金属与稀土应用，1982(2)：19-23.
[104] 施瑞鹤. 稀土金属对铜流动影响的研究. 稀土，1986.
[105] В. Я. Алехин，赵德溯译. 光亮铜杆的工艺特点. ЦВетные Металлы，1987(4)：75-77.
[106] 用浸涂成形法生产铜杆(译文). Wire industry，1971(6)：402-406.
[107] 黄崇祺(译). 用100%废铜生产连铸连轧铜杆. 电缆金属文集，209-227，2001，上海电缆研究所.
[108] 黄崇祺译. 电工用拉制铜杆标准(ASTM B49—98)，电缆金属文集，2001年，上海电缆研究所出版，160-177.
[109] ASTM. B—1 and B2 tast Group，The Anneal ability testing of Copper，Journal of testing and evaluation，vol，1，No1，1973.
[110] 李震宇等. 世界有色金属材料成分与性能手册. 冶金工业出版社，1992年第1版，第1289-1295.
[111] 常州无线电材料总厂. 选择电磁用铜杆的探讨. 技术资料，1992.
[112] Yea—Yang Su. Analysis of the factors affecting the drawability of copper rod，wire journal，1982(1)：74-79.
[113] Rolf Zimmermann，Gerhard H. Geiger. Development tendencies in copper drawing Compounds. wire，1992(1)：107-108.
[114] 湖南特种电磁线厂. 无氧铜排技术鉴定资料，1993：4.
[115] 江阴市电工合金有限公司. 高硬度银铜梯排. 科技成果鉴定资料，1997：3.
[116] 山根泰夫等. 高导电无氧铜的特性和应用. 电线电缆，1987(1)：32-38.
[117] P. Gregory. The Electrical Conductivity of copper. Metallurgia，1965(5)：207-214.
[118] Roger N. Wright. Applications of microhardness measurement to Wire products analysis. wire journal，1981(1)：86-89.
[119] Eric Fisk. Alloy Conductor developments. Wire and cable，May/June，2005：35-39.
[120] 黄崇祺. 电缆金属文集. 上海：上海电缆研究所，2001.
[121] 王祝堂，田荣璋. 铜合金及其加工手册. 长沙：中南大学出版社，2002.
[122] 彭立明. 凝固工艺对自生复合Cu-Cr合金电车线综合性能的影响，功能材料，2001，32(2)：158-160.
[123] 丁雨田. 接触线材料的现状及研究热点. 电线电缆，2004(2)：1-9.
[124] ASTM B105-2000. Standard specification for Hard-Drawn Copper Alloy Wire for Electric Conductors.
[125] ASTM B624-2005. Standard specification for High-strength，High-conductivity Copper-Alloy Wire for Electronic Application.
[126] MIL-W-82598 (OS)-1972. Military Specification wire，Copper-Cadmium Alloy.
[127] GJB 1640—1993. 国家军用标准航空航天用电线电缆导体品种及截面系列.
[128] BS EN 2083：2001. Aerospace Series-Copper and Copper alloys Conductors for electrical cable-product standard.
[129] 法国FSP-one公司. 高科技的单芯线及多股绞线产品样本.
[130] Temco公司. The wire specialists产品样本.
[131] BS EN 13605：2002. Copper and Copper alloys-Copper Profiles and profiled wire for electrical purposes
[132] Nexans (France). Wire and cable for transportation-Traindepend on good Contact wire in catenaries. Wire and cable ASIA，2005 (5/6)：28.
[133] 张强. 我国高速电气化铁路接触线与承力索的研制. 电气化铁道，1997 (2)：9-14.
[134] TLM of Alcatel Cable样本. Copper and Copper alloys for the Catenary system. 2001.
[135] 三菱电线工业株式会社. 双沟形铜和铜合金接触线技术资料，1999.
[136] H. MATSUO. High-strength Copper Alloy Trolley Wire (PHC Trolley wire) Technical Report. Mitsubishi Cable Industries，LTD. July，20，2000.
[137] 牛玉英等. 银铜合金接触线新工艺的研究. 中国铁道科学，2005 (3)：99-103.
[138] 林河成. 金属镧材料的生产及应用. 稀土材料，2005 (12)：20-24.
[139] 邓楚平等. 热处理工艺对用微量Cr合金化的Cu-Zn合金组织性能的影响. 世界有色金属，2005 (12)：18-19.
[140] Takaaki Ichikawa. Fine copper wire Containing a Small Amount of Sn. HiTACHi cable Review No. 19. 2000 (8)：47-50.
[141] Hakaru Matsui. Copper-alloy wire Excellent Bending properties over a wide loaded-strain Range for Flexibbe cable. HITACHI Cable Review No. 19，2000 (8)：51-54.
[142] Takaaki Ichikawa. Properties of Ultra coaxial cable for Electric Equipment. HITACHI Cable REVIEW No. 22. 2003 (8)：47-50.
[143] Seigi Aoyama. High-performance Coated wire Electrodes for High-Speed cutting and Accurate Machining. HITACHI cable Review，No. 18，1999 (10)：75-80.
[144] Hiromitsu Kuroda. Development of High performance coating wire Electrodes for High-speed cutting and Accurate Machining. HITACHI Cable REView No. 22，2003 (8)：51-56.
[145] Erics. Fisk. Development in Alloy Conductors. Wire and Cable technology international，2003 (9/10)：24-28.
[146] 欧盟环保令考验中国电子电器出口商. 电线电缆行业经理参考. 上海电缆研究所信息中心，2005 (4)：2.

[147] John Corrado, phelps dodge. New Environmentally Friendly Copper Alloy for wire Applications. Wire and cable technology international, 2004 (11/12): 38.
[148] Jim Keebler. Cadmium-Free Conductors. Wire and cable technology international, 2004 (11/12): 70.
[149] 袁振宇. 时效对 Cu-Fe-P 合金显微硬度及电导率的影响. 热加工工艺, 2002 (3): 33-34.
[150] 2003 导体与装备技术研讨会文集. 上海市: 上海电缆研究所, 2003.
[151] 李震夏. 世界有色金属材料成分与性能手册. 第 1 版, 北京: 冶金工业出版社, 1992.
[152] 张兆渭, 黄崇祺. 高温绝缘用金属导电线芯. 电线电缆, 1985(2): 11-15.
[153] 高温绝缘用金属导体的选择. Wire journal international, 1983(6): 42-50.
[154] Donald A. Hay. CR—155: a new high—Conductivity, high—strength Copper for the wire industry. Wire journal, 1979(9): 132-134.
[155] PD—135 高导、高强度、高延展性的高铜合金. Wire journal, 1979(9): 138.
[156] E. ling, P. W. Taubenblat. Higy Conductivity Copper and Aluminum—High Conductivity Copper and Copper Alloys. A publication of the Metallurgical Society of AIME, 1984, 19-29.
[157] TB/T 3111—2005. 中华人民共和国铁道行业标准—电气化铁道用铜及铜合金绞线.
[158] TB/T 2809—2005. 中华人民共和国铁道行业标准—电气化铁道用铜及铜合金接触线.
[159] Pr EN 50149. Railway Application—Copper and Copper alloy grooved Contact wire (Final Draft). Clc/sc 9xc(SEL)82, 1993-11-12.
[160] 黄崇祺. 接触导线制造新工艺及有关问题探讨. 电线电缆, 2005(12): 6-7.
[161] 龚永康, 吴彦卿. 镧铜合金性能. 上海铜材厂, 上海电器科学研究所, 1983.
[162] 黄崇祺. 国外裸电线发展(水平综述). 电线电缆, 1978(6).
[163] 刘技文. 稀土铜铬锆合金性能的研究. 上海金属(有色分册), 1993(10): 10-13.
[164] Seigi Aoyama. High—strength/High—Conductivity Cu—Sn—In Alloy wires formed by Continuous casting and Hot rolling. HiTACHi Cable Review, 1994 (8): 75-78.
[165] E. H chia. Wire journal, 1976(2): 68-77.
[166] B. Avitzur. Wire journal, 1974(11): 77-86.
[167] H. Tanaka. Journal of Furukawa denko, 1975 (59): 91-98.
[168] Jogashi. Journal of Furukawa Denko, 1979 (66): 25-32.
[169] H. Tanaka. Journal of Japan Metallurgical society, 1979(43): 618-625.
[170] H. Tanaka. Journal of Japan Society of plastic forming. 1983(24): 464-470.
[171] 田荣璋, 王祝堂. 铝合金及其加工手册. 第 2 版. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
[172] 王伯云等. 中国材料工程大典. 第 1 版. 北京: 化学工业出版社, 2006.
[173] 丁关森, 黄崇祺, 沈建华. 影响铝线强度的因素. 2003 导体装备技术研讨会文集, 上海电缆研究所出版, 2003 年 9 月, 上海: 122-132.
[174] 葛爱平, 文九巴. 中原再生铝市场现状及发展前景. 中国铝业, 2005(7): 31-34.
[175] 黄崇祺, 丁关森, 李文浩. 中国电工铝导线的研究、开发和生产. 电线电缆, 2005(4): 3-7.
[176] PECHINEY Aluminium Engineering 公司. ALPUR 样本.
[177] 刘顺华, 王桂芹等. 高电导率含硼铝导体的研制. 电线电缆, 2003(4): 16-19.
[178] Joseph F. Scalise and Katherine Helmetag. Aluminum Wiredrawing filtration. Wire journal international, 2000(9), 88-93.
[179] 高峰, 张志昌, 林年福. 绕组线的市场空间和"十一五"行业发展. 绕组线行业"十一五"发展研讨会论文集. 中国电器工业协会电线电缆分会, 2005: 1-50.
[180] 李会文. 细径化漆包铝线前景分析报告. 绕组线行业"十一五"发展研讨会论文集. 中国电器工业协会电线电缆分会, 2005, 84-90.
[181] 冯锦泉, 付旭平等. 漆包铝圆线用铝材, 绕组线行业"十一五"发展研讨会论文集. 中国电器工业协会电线电缆分会, 2005, 91-99.
[182] 安徽铜陵首条漆包圆铝线项目试车成功. 行业论坛. 上海电缆研究所信息中心, 2005(11): 29.
[183] IEC 317-0～3(1990). 特种绕组线产品标准第 0 部分. 一般要求 第 3 节 漆包铝圆线.
[184] ANSI/NEMA MW 1000—1997 标准. 绕组线. 第一部分 总论.
[185] 好富顿(深圳)有限公司. 铜线和铝线拉伸润滑剂(样本).
[186] 黄豪士, 毛庆传, 沈建华, 季世泽, 陆盛叶. 三峡送出工程±500kV 主干线路用大截面导线的研究. 三峡送电工程用导、地线技术研讨会论文集. 2003, 108-117.
[187] 我国首条电力"高速公路"建成——电网技术跨入世界先进行列. 科技日报, 2005 年 9 月 27 日, 第 1 版.
[188] 首个特高压电网工程设备主要立足国内. 科技日报, 2006 年 7 月 26 日, 第 3 版.
[189] 淮北至上海将建 1000 千伏电网——西电东送有望迎来新通道. 文汇报, 2005 年 9 月 29 日, 第 2 版.
[190] 刘士璋. 330kV 电站用扩径空心导线研制. 机械工业部上海电缆研究所成立 40 周年(1957—1997)纪念文集, 上海电缆研究所.
[191] 上海电缆研究所. 750kV 线路用扩径导线及耐热母线研制. 研究报告, 2005 年 6 月.
[192] 我国第一条光纤复合相导线(OPPC)光缆线路在深圳建成并投运. 电线电缆信息, 上海电缆研究所信息中心, 2005(6): 30.
[193] 黄豪士. 自阻尼导线. 上海电缆研究所(1957—1997) 40 周年专辑, 1997 年.
[194] Y. ohki 和 S. Yasufuku, 黄崇祺译. 新颖碳纤维加强的铝导线. IEEE Electrical Insulation magazine,

July/August 2003(4): 67-69.
[195] 远东控股集团有限公司. 输变电线路的颠覆性突破——ACCC碳纤维复合导线挂网运行. 远东报, 2006年6月30日, 第1版.
[196] composit Technology Corporation. ACCC Power transmission and distribution Cable benefit Summary. 2005.
[197] 远东复合技术有限公司. 复合芯梯形单线同心层绞铝导线检验报告. 上海电缆研究所电工材料及特种线缆质检中心, 2006年.
[198] 特高压交、直流: 相辅而非对立. 科技日报, 2006年11月20日.
[199] 特高压的足迹(2004年12月~2006年11月). 科技日报, 2006年11月28日.
[200] 从电力大国迈向电力强国. 科技日报, 2006年11月28日.
[201] 特高压项目决策始末. 电线电缆报, 2006年12月15日.
[202] 黄崇祺. 铝拉线润滑剂及其过滤系统的新进展. 电线电缆, 收稿日期2006年12月.
[203] 黄崇祺. 关于导电铝及其合金中的杂质和添加物对电导率的影响. 上海电缆研究所技术资料, 1978年8月.
[204] 黄崇祺. 电缆金属文集. 上海电缆研究所, 2001年版: 5-44.
[205] GB/T 1196—2002 重熔用铝锭标准.
[206] 一机部上海电缆研究所, 沈阳电缆厂, 抚顺铝厂. 提高国产铝导体性能研制电工用铝的研究, 研究报告. 上海电缆研究所, 1979年11月29日.
[207] 杨其璧. 铝的精炼与铝的性能. 电线电缆, 1986(4): 40-44.
[208] 三菱电线工业. 电线要览: 1166, 1170.
[209] 黄崇祺, 丁关森, 储成著, 沈建华. 电工铝导体生产. 电线电缆, 1987(5): 53-56.
[210] 黄崇祺, 储成著, 丁关森, 沈建华. 稀土优化综合处理在电工铝导体生产中的应用. 电线电缆, 1986(6): 31-35.
[211] Horace Pops. Factors affecting the annealing behavior of aluminum Wire. Wire journal, 1980(2): 72-76.
[212] 黄崇祺. 铜、铝导体生产的发展趋向及有关问题的研讨. 2003导体与装备技术研讨会文集, 上海电缆研究所出版, 2003年9月, 上海: 32-52.
[213] D. A. Granger, L. D. Hammar, E. Salas. The effect of cast structure on the production of EC redraw rod for magnet wire. Wire journal international, 1994(2): 88-96.
[214] Dietmarkuhn. High-quality wire for high-tech applications. Wireworld, 1993(2): 24-28.
[215] 上海电缆研究所, 上海铝线厂. 细铝线拉伸工艺的试验研究报告. 1970年, 上海.
[216] 上海电缆研究所, 上海铝线厂. XLJ-13型铝线拉线机试验研究报告. 1970年, 上海.
[217] 哈尔滨电线厂. 细漆包铝线的生产. 电线电缆, 1975(3): 17-18.
[218] NIEHOFF M315铝线中拉机和H20铝线小拉机. 1995年.
[219] 黄崇祺. 330kV扩径架空导线的研究. 中国电机工程学会"电线电缆学术报告讨论会", 1979年12月, 上海电缆研究所.
[220] 刘士璋, 黄豪士. 500kV电站用软母线的试验研究. 电线电缆, 1981(1): 13-17.
[221] IEC 62219: 2002. 型线同心绞架空导线.
[222] GB/T 20141—2006. 型线同心绞架空导线.
[223] IEC 6××××: 200×, Concentric lay overhead Electrical stranded Conductors containing one or more self—Supporting layer. 2005(草案).
[224] 上海电缆研究所. 国外电线电缆技术发展概况(专辑之一)——裸线. 电线电缆, 1973(2): 1-9.
[225] Z. M. Kosek. Manufacturing of 6101 Aluminum Alloy Trapezoidal wire for overhead conductors. 电线电缆信息, 2002(1): 6-9.
[226] 王在勋. 铝合金杆的制造工艺与设计配套. 电线电缆, 2004(5): 13-15(18).
[227] 周晓霞. 稀土元素在铝合金中的作用和应用. 稀土信息, 2003(6): 18-20.
[228] JEC 197(日本标准). 耐热アルミ合金线(60TAL, 58TAL)和超耐热アルミ合金线(60UTAL, 58UTAL).
[229] JCS 363(日本标准). 高力アルミ合金线(KAL)和高力耐热アルミ合金线(KTAL).
[230] JEC74(日本标准). ィ号アルミ合金线(IAL).
[231] 黄崇祺等. 架空电力线路用大容量导线. 现代电力技术新进展(科技学术论文集2004), 2004: 218-224, 原子能出版社.
[232] 江门市新会三新电工器材有限公司. 高导电(60% IACS)耐热铝合金导线. 鉴定资料, 2003年6月3日, 上海电缆研究所.
[233] 江门市新会三新电工器材有限公司. 钢芯耐热铝合金绞线. 试验报告, 2003年3月, 上海电缆研究所.
[234] 黄崇祺, 李文浩, 丁关森. 一种制造非热处理型高导电耐热铝合金线的方法. 中国发明专利号: 021371385.
[235] IEC 62004—2007, Thermal-Resistant Aluminum Alloy Wire for Overhead Line Conductor.
[236] 尤传永. 耐热铝合金导线的耐热机理及其在输电线路中的应用. 电力建设, 2003(8), 4-8.
[237] 日本三菱电线工业株式会社, 池田毅. 日本专利特许号第2628235, 1997年.
[238] 李文浩, 徐睿等. 特高强度耐热铝合金在中天铝线有限公司试制获得成功. 电线电缆报, 2005年5月20日.
[239] 王庆良, 郑雪萍. 稀土导电铝合金的铸态组织和相组成. 稀土, 1998(1).
[240] 刘书珍, 王冰. 稀土对Al-Mg-Si系合金结构和性能的影响. 稀土, 1998(3).
[241] 住友电工. 高强度耐热铝合金线及其架空导线和制造高强度耐热铝合金的方法. 专利号CN 1163317. 1997年10月29日.
[242] 日立电线株式会社. 导电用耐热铝合金. 专利号JP 2002302727, 2002年10月18日.

[243] 日本三菱电线株式会社. 导电用耐热铝合金的制造. 专利号 JP 11350093，1999 年 12 月 21 日.
[244] 日本 Nippon Light 公司. 制造耐热铝合金及其线的方法. 专利号 JP 200125413，2001 年 9 月 18 日.
[245] JB/T 8998—1999. 电缆编织屏蔽用铝合金圆线. 电线电缆标准集，Vol. 15(2000)，上海电缆研究所出版.
[246] 张卫星. 提高输电线路耐蚀型铝合金导线导电性能的研究. 电线电缆，2004(3)：18.
[247] 黄崇祺等. 电缆编织屏蔽用特细铝合金线的研究. 上海电缆研究所研究报告，1998 年 5 月.
[248] 黄伯云等. 铝及铝合金. 中国材料工程大典(第 4 卷，上). 北京：化学工业出版社，2005.
[249] 田荣璋，王祝堂. 铝合金及其加工手册. 第 2 版. 长沙：中南大学出版社，2000.
[250] PHIFER 公司. PHIFER 编织用铝线(产品样本).
[251] 陈宝盛. 铝合金导线拉制工艺. 光纤与电缆及其应用技术，1997(4)：55-58.
[252] ASTMB211M. Standard specification for Aluminum and Aluminum—Alloy Bar，Rod and Wire.
[253] 临安市新联线缆材料有限公司. 高性能电缆编织屏蔽用铝镁合金圆线(鉴定材料)，2003 年 11 月.
[254] J—power systems corporation. 殷钢导线(ZTACIR 铝包殷钢芯超耐热铝合金导线，XTACIR 铝包殷钢芯特耐热铝合金导线). 产品样本，2006.
[255] J—power systems corporation. GTACSR 间隙型耐热钢芯铝合金绞线和 GZTACSR 间隙型超耐热钢芯铝合金绞线. 产品样本. 2006.
[256] Fujikura Ltd. INVAR Conductor for Uprating Transmission Capacity and Reducing Sag. 产品样本，2004 年 3 月.
[257] Sprint melal(瑞士). InVar Reinforced Cable (Power Transmission：High Voltage lines from 60 to 400kV). 样本.
[258] 朱正冬，胡建明. 三峡工程用特高强度钢芯铝合金大跨越导线的研制. 电线电缆，2002(12)：17-19.
[259] 黄豪士，毛庆传等. 三峡工程±500kV 直流输电线路用大跨越导线的研究. 电线电缆，2002(10)：3-7.
[260] 卢致皓译. 新型大容量低弧垂导线的研发.《2003 IEEE PES Transmission and distribution Conference》Conference proceeding.
[261] 上海电缆研究所. 国外裸电线发展水平综述. 电线电缆，1978(6)：19-24.
[262] 横田等. 铝合金导线的应用. 电线电缆，1983(4)：42-48.
[263] 上海电缆研究所. 热处理型高强度铝镁硅稀土铝合金导线的制造工艺. 上海电缆研究所技术资料，1994 年 6 月.
[264] 上海电缆研究所. 热处理型铝—镁—硅系铝合金架空导线的生产. 电线电缆，1975(9)，1-12.
[265] 大日日本电线株式会社. 输配电线路用 KAL 铝合金架空导线. 上海科学技术情报研究所技术资料，1972 年 11 月.
[266] JB/T 8134—1997(idt IEC 104：1987). 架空绞线用铝—镁—硅系合金圆线. 电线电缆标准集，Vol. 14(1999)，上海电缆研究所出版.
[267] 杨玉坤. 半导体器件键合用铝—硅合金微细丝的研究. 轻合金加工技术. 1990(9)：42-44.
[268] 武汉电线电缆总厂. 铝—镁—硅—稀土铝合金导线在超高压输电线路中的应用. 电线电缆，1983(3)：24-25(62).
[269] 松田好夫等(日本). 耐热铝合金在导线中的应用. 电线电缆，1983(3)：26-31.
[270] 范靖亚. 铝合金熔炼中的加锆(Zr)方法. 轻合金技术，1994(11)，12-14.
[271] 森范宏(日本)等. 超耐热アルシ合金(SSTAL)とその应用. 住友电气，1974(昭和 49 年 3 月)，第 108 号：41-47.
[272] 住友电工，Yokata. 高强度耐热铝合金导线. 专利号 US 4182640，1980 年 1 月 8 日.
[273] 住友电工. 导电用耐热铝合金线. 专利号 JP 59157252，1984 年 9 月 6 日.
[274] 王守礼. 钢芯铝合金绞线在高海技重冰线路上的应用. 电线电缆，1987(5)：14-18.
[275] 魏大章，曹大力. 环保型铁路贯通线的设计和研究. 电线电缆，收稿日期 2006 年 11 月.
[276] 黄豪士. 双金属线材的制造与应用. 中国电线电缆，2003 (8)：5-10.
[277] 高飞等. 连续挤压包覆技术在铝包钢丝生产上的应用. 连续挤压论文集，大连交通大学，连续挤压工程研究中心出版：2005 年 11 月，129-132.
[278] B. W. E Ltd-UK，创新 Conform 系列. Wire and cable ASIA，2005 (3/4)：53.
[279] 黄崇祺. 我国电力牵引用接触线的发展与展望. 电线电缆，2003 (2)：3-8.
[280] 陈峰. 铝包钢线在光纤复合架空地线中的应用. 电线电缆，2002 (6)：11-14.
[281] 段国权等. 铝包钢线的生产技术及其在架空输电线路中的应用. 电线电缆，2005 (1)：3-7.
[282] 王延辉等. 铝包钢线的性能特点及其应用分析. 电线电缆，2001 (5)：6-9.
[283] D. J. Hawkes (BWE Ltd.). 智能化铝包钢线包覆生产线. "Wire AsiA"学术会议论文，2002 年 11 月，上海.
[284] 三峡送电工程用导、地线技术研讨会(论文集). 2003 年 11 月，武汉·宜昌.
[285] 黄豪士，毛庆传等. 三峡工程±500kV 直流输电线路用大跨越导线的研究. 电线电缆，2002 (5)：3-7.
[286] 毛庆传，姜正权. 三峡水利枢纽工程成套设备研制(技术总结报告). 中国机械工业联合会，2005 年 9 月.
[287] 黄豪士，毛庆传等. 三峡工程 500kV 大容量输电线路用导线之二——主干线路大截面 ACSR/AS-720/50 的研究. 电线电缆，2002 (3)：18-20.
[288] Bogdan Golis. Drawing practice of steel wires with pressure dies. Wire journal international，1997 (3)：54-67.
[289] Edward Matthews. Pressure die drawing of aluminum alloys. wire journal international，2002 (3)：114-117.
[290] 上海电缆研究所. 电工用铝包钢线. 电线电缆标准

集，Vol，15，2000 年，上海电缆研究所出版，上海.

[291] 上海电缆研究所. 光纤复合架空地线. 电线电缆标准集，Vol，15，2000 年，上海电缆研究所出版，上海市.

[292] Alan Gibson. The Economics of copper-clad Aluminum Bimetallic cable. wire and cable technology international，2005 (7)：82-83.

[293] M Mozetic. Self-controlled diffusion of Al in cu thin film. pergamon，1998 Elsevier science Ltd: Vacuum/volume 50/number：1998，1-3.

[294] 孙德勤. 铜包铝复合线材制造技术的发展现状与前景. 电线电缆，2003 (6)：3-6.

[295] 胡捷. 铜包铝复合线材静液挤压加工工艺研究. 成形加工与热加工技术，2001 (9)：27-28.

[296] 杨正荣. 一种防铝线氧化的金属剥皮机. 实用新型专利. 专利号：98206318. 0.

[297] 戴维康. 生产铜包铝线的包覆焊接装置. 实用新型专利，专利号：96238273. 6.

[298] 孙慎林. 浅谈电镀法铜包铝线和铜包钢线. Radio and TV Broadcast Engineering，1996 (10)：102-105.

[299] 黄崇祺译. 铜包铝线标准. ASTM B566-2002.

[300] Standard specification for copper-clad Aluminum wire. ASTM B566—04.

[301] 铜包铝线标准. SJ/T 11223—2000.

[302] 铜包铝母线持续载流量的设计，DIN 43670—85，Teil.

[303] 张国光. 以铜包铝线为内导体的 CATV 同轴电缆的特性. 电线电缆报，2006. 3. 17.

[304] 黄豪士. “十五”期间裸电线的技术进步. 行业论坛，2006 (2)：17-25.

[305] commscope Bimetals. 通信网络(有线、无线)中的铜包铝线和铜包钢线 . Wire and cable technology international. 2004 (11/12)：41.

[306] Copperweld Bimetallic product，Brian Suwarow. 双金属线用于汽车行业 . Wire and cable ASIA，2003 (11/12)：60-63.

[307] James Shandersky of Technology TY CO Electronics corporation. Crimp tooling：Where Form Meets Function part 3 of 3. Wire and Connector，2006 (1)：68-69.

[308] Wagne perrard. 采用双金属优化电缆设计和性能的策略. Wire journal international，2001 (7)：50-53.

[309] 费保俊. 采用铜包钢复合线的对称电缆邻近效应. 电线电缆，2001 (2)：27-29.

[310] 王庆娟等. 铜包钢线生产工艺的特点及现状. 电线电缆，2002 (4)：15-17，27.

[311] Standard specification for copper-Clad steel Electrical Conductor for CATV Drop wire. ASTM B869—04.

[312] 铜包钢丝被复线性能检测报告. 东北大学，2005. 3.

[313] 铜包钢丝检验报告. 上海电缆研究所材料及特种光电缆检验实验室，2004(6).

[314] Standard specification for Hard-Drawn Copper-Clad steel wire. ASTM 227—04.

[315] Standard specification for Copper-clad steel wire for Electronic Application. ASTM B452—02.

[316] 高伟国. 镀铜接地棒在变电站接地网改造中的应用. 上海电力，2004 (6)：529-532.

[317] Anomet products In—C—USA，Corrosion resistance at high temperatures. wire and cable AsiA，2005 (3/4)：10.

[318] Masoud Garshasb. Analysis of tin-and nickel-plated Copper Wire failures for quality improvement，wire journal international，2002 (9)：86-90.

[319] 上海银木电器制造公司. 镀银铜线可行性研究报告.

[320] ASTM B298—99. Standard specification for silver-Coated Soft or Annealed Copper wire.

[321] ASTM B501—99. Standard specification for silver-Coated. copper-clad steel wire for Electronic Application.

[322] ASTM B559—2002. Standard specification for Nickel-Coated，Copper-Clad steel wire for Electronic Application.

[323] ASTM B520—2002. Standard specification for Tin-Coated，Copper-Clad steel wire for Electronic Application.

[324] 罗序燕等. 铜线材电镀可焊性锡工艺. 材料保护. 2000 (5).

[325] 陈文华，王玲. Sn-Zn 镀层钎焊性研究. 材料保护. 1999 (1).

[326] 樊江莉，赵国鹏等. 化学镀可焊性 Sn-pb 合金工艺. 材料保护，2001 (7)：24-25.

[327] 陈华茂，吴华强. 超声波对锡铈合金镀液性能的影响. 材料保护. 2005 (7)：11-13.

[328] 李学俊. 镀镍软铜线制造工艺的改进——氨基磺酸盐镀镍. 电线电缆，2001 (1)：46-48.

[329] ASTM B355—2003. Standard specification for Nickel-Coated Soft or Annealed copper wire.

[330] 屈战民. 酸性光亮镀锡铈合金工艺. 材料保护. 2003 (9)：67-68.

[331] 汤宝钜，陆春校，黄欣. 铜包铝线在市内通信电缆中的应用. 电线电缆，2007(1)：17-20.

[332] 张险峰，马军，管新元. 铜包铝线代替铜线作为编织屏蔽材料的可行性分析. 电线电缆，2007(1)：21-23，37.

[333] 黄崇祺. 双金属导线的制造和应用. 国外电线电缆，1980(3)：1-8.

[334] 黄崇祺. 国外电线电缆技术发展概况—裸线. 电线电缆，1973(2)：1-18.

[335] T. Saito，毛庆传，黄崇祺译校. 影响双金属线疲劳性能的因素. 电线电缆，1988(5)：29-33.

[336] 黄崇祺. 圆铝线一次成型压接法制造的铝包钢线. 中国电机工程学会“电线电缆学术报告讨论会”论文. 1979 年 12 月：1-10.

[337] 黄崇祺，张守仁，张学民等. 我国第一条铝包钢线流水线投入生产(研究报告). 1972 年 8 月：1-41.

[338] 广木长崎. 复合材料在接触导线上的应用. 日本铁路工程，1992，No116：7-10.

[339] 第一机械工业部上海电缆研究所. 日本住友电工电线技术代表团交流资料汇编(裸线部分). 1965 年 8 月.

[340] 刘士璋. 南京长江大跨越架空输电线. 电线电缆，1978(2)：11-21.
[341] Weinhold. Hydrodynamic pressure lubrication with solid soap films for wire drawing. wireworld，1993 (5)：24-27.
[342] 黄崇祺. 压力模专题论文译文集(1—3)——未发表，1971 年.
[343] 吕鸣辉，黄崇祺. 美国伯利恒公司的镀铝钢线生产线. 电线电缆，1981(4)：47-50.
[344] 上海电缆研究所. 电力牵引用接触线. 电线电缆标准集，Vol，11，1993 年，上海电缆研究所出版，上海市.
[345] 上海电缆研究所. 铜包铝线的生产. 电线电缆，1976(1)：9-18.
[346] 上海电缆研究所. 国外裸电线发展水平综述. 电线电缆，1978(6)：19-40.
[347] 被复线通用规范. GJB 882A—2002.
[348] 铜包钢线产品样本. 上海瓦恩德特种金属材料有限公司.
[349] 电工用铜包钢线企业标准，Q/320412 HTR003—2003. 常州市武进恒通金属钢丝厂.
[350] 镀铜钢线样本. 泰州市中义电缆厂.
[351] 黄崇祺. 铜包钢电车线(接触网导线). 电缆金属文集，上海电缆研究所出版，2001 年，231-243 页.
[352] 电力牵引用接触线 GB 12071.3～4—91. 电线电缆标准集，VoL. 11，1993 年，上海电缆研究所出版，25-33 页.
[353] Hiroki Nagasawa 等. Dovelopment of cs Trolley wire (Copper clad steel Trolley wire). FUJIKURA technical review，1990(2)：43-48.
[354] CS Trolley wire (Copper clad steel Trolley wire)样本. FUJIKURA.
[355] 孙兆渭，黄崇祺. 高温绝缘用金属导电线芯. 电线电缆，1985(5)：12-15.
[356] Devendra K，Sanghavi. Selecting metallic conductors for high-temperature insulations. wire journal international，1983(6)：42-50.
[357] GJB—773A—2000. 航空航天用含氟聚合物绝缘电线电缆通用规范.
[358] GB 4910—1985 镀锡圆铜线标准.
[359] JB/T 3153—1999 镀银软圆铜线标准.
[360] GB 11019—1989 镀镍圆铜线标准.
[361] 王林大. 电子元器件用引线——镀锡铜包钢线. 电线电缆，1982(6)：18-22.
[362] 王林大. 日本住友公司的镀锡铜包钢线. 电线电缆，1982(1)：44.
[363] 周流旺. 铜线的电解镀锡. 电线电缆，1987(5)：56-58.
[364] 张海洪，王柏新. 电镀法与热镀法生产镀锡铜线的比较. 电线电缆，1983(2)：54-56.
[365] 于南. 厚镀层镀锡铜线的连续热镀. 电线电缆，1983(2)：57-60.
[366] Wire industry. 1978(538)：861-864.
[367] Shinichi Mukoyama. Development of 500m HTS Power Cable in Super-ACE project. Cryogenics，2005 (45)：11-15.
[368] Kouhei Yamazaki. Development of Bi-based Superconduting Wire. SEI TECHNICAL REVIEW，2004 (6)：16-22.
[369] 尹志国. 高温超导体的开发及其在发电设备上的应用. 电气技术，2005 (9)：29-31，49.
[370] 林良真. 我国超导技术研究进展及展望。电工技术学报，2005 (1)：1-7.
[371] RONALD M. Superconducting Meterials for Large Scale Applications. Proceedings of IEEE，2004 (10)，92：1639-1652.
[372] 西部超导材料科技有限公司. www. c-wst. com 网站信息，2005 年.
[373] F. Greene. High energy accelerator applications for Superconductor materials. Wire journal international，2003 (1)：77-79.
[374] J. A. Parrell. Nb-Sn Conductor development for fusion and particle accelerator applications. Adv. Cryogenic mater.，2004 (50).
[375] A. F. Lietzke. Test results for HD1，a 16T Nb-Sn dipole magnet. IEEE Trans，Appl，Superconduct，2004 (14).
[376] P. J. Lee et al. The microstructure and microchemistry of high Critical current Nb-Sn strands manufactured by the bronze，internal-Sn，and PIT techniques. IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2003 (6)：3422-3425.
[377] J. Lindenhovius et al. power-in-tube (PIT) Nb-Sn conductors for high field magnets. IEEE Trans. Appl. Superconduct，2000 (3)：975-978.
[378] 张惠群等. 超导研究的新热点：二硼化镁. 电气技术，2001 (7)：17-18.
[379] R. Flukiger et al. Superconducting properties of MgB_2 tape and wire. Physica c，2003 (385)：286-305.
[380] W. goldacker et al. Considerations on critical currents and stability of MgB_2 wire made by different preparation routes. Physica c，2004 (401)：80-86.
[381] J. M. Rowell. The widely Variable resistivity of MgB_2 samples. Supercond. Sci. technol，2003 (16)：R17-27.
[382] R. F. klie et al. observation of coherent oxide precipitate in polycrystalline MgB_2 Appl. Phys. Letter，2002 (80)：3970.
[383] X. Song. Inter-and intra-granular nonstructure and possible spinodal decomposition in low resistivity bulk MgB_2 with Varying Critical fields. J. Mater. Res，2004.
[384] S. Y. Xu et al. High critical current density and Vortex pinning of epitaxial MgB_2 thin films. Phys. Rev. B，2003 (68)：224.
[385] V. Braccini et al. (2004) High-field superconductivity in alloyed MgB_2 thin films. Condens. Matter [on line]. Available：http：//arxiv. Org/pdf/cond-mat/0402002.
[386] R. H. T. Wilke et al. (2003) Systematic effects of carbon doping on the superconducting Properties of

Mg (BC). Cendens. Matter Archive [on line]. Available: http://arxiv. Org/abs/cond-mat/0312235.

[387] E. ohmichi. (2003) Enhancement of the irreversibitity field by Carbon substitution in single crystal MgB_2. Condens. Matter Archive [on line]. Available: http: //arxiv.. Org/abs/con-mat/0312348.

[388] S. X. Dou et al. Enhancement of the critical current density and flux pinning of MgB_2. superconducter by nanoparticle sic doping. Appl. Phys. Lett, 2002 (81): 3419-3421.

[389] 北京英纳超导技术有限公司. 产品样本和技术简介, 2003 年.

[390] American superconductor corporation. 产品样本, 2004 年.

[391] FURUKAWA Electric. 产品样本, 2005 年.

[392] S. patnaik et al. Local measurement of current density by magneto-optical current reconstruction in normally and overpressure processed Bi-2223 tape. IEEE Trans. Appl. Superconduct, 2003 (6): 2930-2933.

[393] Y. B. Huang et al. Improving the critical current density in Bi-2223 wires via a reduction of the secondary phase content. IEEE Trans. Appl. Superconduct, 2003 (6): 3038-3041.

[394] Y. Yuan et al. overpressure processing of Ag-Sheathed (Bi, pb) SrCaCuO tape. Physica c, 2002 (372-376): 883-886.

[395] Y. Yuan et al. Significantly enhanced critical current density in Ag-sheathed (Bi, pb)SrCaCuO Composite Condectors prepared by overpressure processing. Apple. Phys. Lett, 2004 (84): 2127-2129.

[396] F. Buta. Influence of transformation heat treatment on microstructure and defects in RHQT Processed NbAl. IEEE Trans. Apple. Superconduct. 2003 (6): 3458-3461.

[397] H. W. Weijers et al. Development and testing of a 3T Bi-2212 insert magnet for high field NMR. IEEE Trans. Apple. Superconduct. 1999 (6): 563-566.

[398] T. kiyoshi et al. Generation of 23.4 T using two Bi-2212 insert coil. IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2000 (3): 472-477.

[399] R. Gupta et al. status of high temperature superconductor magnet R&D at BNL. IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2003 (6): 1351-1354.

[400] Ryosuke Hata. Superconducting power cable made from Drastically Innovative BSCCO wire (DI-BSCCO) fabric cated by the CT-OP process. Sumitomo Electric Industries ltd. 2005 (7): 1-10.

[401] Sumitomo Electric 产品样本. High temperature superconductor. 2005.

[402] Sumitomo Electric 产品样本. Sumitomo 3-in-one HTS cable. 2005.

[403] Sumitomo Electric 产品样本. Sumitomo's 3-in-one in projects KEPRI project ($2.4 million world's first commercial contract for power transmission high-temperature superconducting cable). 2005.

[404] sumitomo Electric 产品样本. Sumitomo 3-in-one HTS cable projects in progress under International collaboration ($26 Million demonstration project of long-length HTS cable in real utility under-ground network in Albany, Ny. 2005.

[405] Sumitomo Electric 产品样本. Sumitomo 2G HoBCO wire High-Tc superconducting Thin Film Tape Fabricated by pulse laser Deposition. 2005.

[406] Sumitomo Electric 技术资料. Development of HoBCO coated conductor. 2005: 14-20.

[407] 美国超导公司技术资料. AMSC-Second Generation HTS: An Assessment. 2004 (7): 1-25.

[408] Sumitomo Electric 技术资料. High temperature superconducting (HTS) power cable and related Activity at Sumitomo Electric, 2005 (6): 1-44.

[409] Yutaka Yamada. Activity and industrialization effect of YBCO coated conductor-long and high Ic conductor and a new nano-structure effective for pinning. 2006 sino-Nippon cooperation symposium on superconductivity and Nanotechnology, Nov. 23 ~ 26, 2006 shanghai, shanghai university. University of toyama.

[410] 美国科学家发现一种超强磁材料. 科技日报(转载自然·物理杂志), 2007 年 2 月 13 日.

[411] 第八届全国超导学术研讨会. 2005, 上海: 国家超导技术联合开发中心, 上海大学.

[412] 西部超导材料科技有限公司. 材料科学与工程手册(特种功能材料篇). 第 1 版, 2005 年.

[413] 音响线缆《电线电缆技术资料汇编》. 上海电缆研究所信息中心, 上海市, 2002.

[414] 刘健. 音响线材及其对音质的影响. 家电大视野, 1998 (3): 14-15.

[415] 詹海峰. 关于线材的一些认识(上、下). 视听世界(无线电与电视), 1998: 10-16, 12-16.

[416] 詹海峰. 纯银、纯铜、合金的较量. 音响线缆(电线电缆技术资料汇编), 上海电缆研究所信息中心, 上海市, 2002: 91-100.

[417] 白木, 周洁. 影响音响线材品质的三大因素. 电线电缆, 2002 (5): 23-27.

[418] 张迪华. 话说音响线-小议《线材发烧》(上、下). 电线电缆报, 2000.9.8.

[419] 马献忠. 郑缆集团建成单晶铜生产线. 电线电缆报, 2003 (8).

[420] 郑州电缆(集团)股份有限公司. 连续铸造单晶铜杆及其产品(样本). 2003.

[421] 上海智诚电讯材料有限公司. 单晶连铸技术及单晶铜连铸工艺研制(项目鉴定资料). 2004.

[422] 王福亮等. 超声功率对粗铝线键合强度的影响. 中国机械工程, 2005 (10): 919-923.

[423] Tsutomu Yamashita. Classification of wire breaks and Countermeasures in superfine gold wiredrawing. Wire journal international, 2005 (3): 180-184.

[424] 田中电子工业株式会社. Products Guide, 2002.

[425] 田中电子工业株式会社. Cu Bonding wire Technical Information, 2003 (2).

[426] 方小东. 国外无模拉丝新技术. 电线电缆, 2001

(4)：15-17.

[427] Vladimir Manov. Microwire and miniaturization. wire，2001 (4)：42-44.

[428] J. J. del val. Correlation of magnetic and Structural properties of glass-coated cu-based microwires. Journal of Magnetism and magnetic Materials，2002 (249)：126-130.

[429] E. N. Khandogina. Magnetic，mechanical properties and structure of amorphous glass coated microwires. Journal of Magnetism and Magnetic Materials，2002 (249)：55-59.

[430] Pitkit Technologies Builds portfolio of Israeli Authentication Technologies. Authentication News-the Issues，strategies and Technologies of Authentication，2002 (6)：1-2.

[431] A. Zhukov. Glass-coated magnetic microwires for technical applications. Journal of magnetism and magnetic materials，2002 (242-245)：216-223.

[432] P. Marin. Applications of amorphous and nanocrystalline magnetic materials. Journal of Magnetism and Magnetic Materials，2002 (215-216)：729-734.

[433] 许西玲. OCC 纯铜线制程技术访万隆电线电缆公司董事长高大山. 工业材料，1994(88)：26-28.

[434] 刘家钦. 电脑模拟在 OCC 制程上之应用. 工业材料，1994(92)：117-120.

[435] 世界有色金属材料成分与性能手册. 第四篇，有色金属及合金加工材料性能，第 41 章，冶金工业出版社，1992 年第 1 版：1087-1089.

[436] 黄崇祺. 国外电线电缆技术发展概况(专辑之一)——第一部分裸线. 电线电缆，1973(2)：1-51.

第4篇　电气功能材料

主编单位：桂林电器科学研究所

主　　编：陈　仲

编写人员：陈妙农　（机械工业北京电工技术经济研究所）

陈敬超　（昆明理工大学）

卢晓东　霍志文　（佛山精密电工合金有限公司）

顾小龙　王大勇　（亚通电子有限公司）

罗汉英　（西安电瓷研究所）

陈京生　梁永和　（桂林电器科学研究所）

第 1 章　电 触 头 材 料

1　电触头与电接触

1.1　电触头分类

电触头(contact)是机械开关电器中的接触元件，当其接触时电路接通。操作时，其相对运动可断开或闭合电路，或靠其转动或滑动保持电路接通。

1.1.1　按工作状态及结构分类

(1) 主触头(main contact)：机械开关电器主电路中的触头。该类触头在闭合位置时承载主电路的电流，要求其接触电阻低、操作可靠和使用寿命长。

(2) 辅助触头(auxiliary contact)：机械开关电器辅助电路中的触头。

(3) 滑动触头(sliding contact)：触头间的相对运动是沿着与触头表面平行方向滑动的一种触头，这类触头要求摩擦系数小和使用寿命长。

(4) 对接触头(butt contact)：触头间的相对运动是沿着触头表面法线方向进行的一种触头。

(5) 滚动触头(rolling contact)：一个触头沿着另一个触头表面滚动以实现接触的一种触头。

(6) 对称配对触头(symmetrically mated contacts)：由相同组分材料组成的动静触头。

(7) 非对称配对触头(asymmetrically mated contacts)：由不同组分材料组成的动静触头。

(8) 复合物触头(composite contact)：由两种或多种互不溶解或互溶度很小的金属以及金属与非金属组成的触头。如银-镍、银-石墨触头。

(9) 复层触头(cladding contact)：由两层或多层不同材料结合而成的触头。例如将贵金属触头层结合到廉金属基层上的平片触头或铆钉型触头。

(10) 整体触头(solid contact)：触头与导电端结合成一体的高压电器用触头元件。

(11) 自力型触头(self-elastic contact)：自身具有弹力、不需外加弹簧的触头元件。

(12) 簧片触头(spring contact)：带有触头或兼有触头作用的簧片导电元件。

(13) 触头元件(contact element)：触头与触桥、导电端、簧片等结合成一体的元件。

1.1.2　按应用领域分类

根据触头在电气设备或线路中承担电流量的大小及用途的不同，可将其分为：

(1) 轻负载电触头——用于电子信息技术领域及控制、测量、调节系统中的工作电压小于 30 伏(V)、电流小于 60 安(A)的电触头。

(2) 低压电器用电触头——用于工作电压小于 1200 伏(V)、电流为 6～2500 安(A)、接通和分断电流可达 10kA 电器中的电触头。

(3) 中高压电器用电触头——用于工作电压大于 1200 伏(V)中高压电器中的电触头。

(4) 真空电器用电触头——用于真空电器的电触头，属中高压电器用电触头范畴。

1.2　电接触的基本概念

(1) 电接触(electrical contact)：接触元件相互接触所实现的导电状态。

(2) 收缩电阻(constriction resistance)：电流通过触头接触处，因电流线急剧收缩而产生的电阻增量。

(3) 膜电阻(contact resistance)：触头表面膜所产生的电阻。

(4) 接触电阻(contact resistance)：电流通过触头时在接触处产生的电阻，它是收缩电阻与膜电阻之和。

(5) 阳极电弧(anode arc)：触头间隙小于一定临界值时所发生的电弧，该电弧导致阳极材料损失。

(6) 阴极电弧(cathode arc)：触头间隙大于一定临界值时所发生的电弧，该电弧导致阴极材料损失。

(7) 电激活(electrical activation)：由触头表面污染物引起的、在低于正常起弧电压下燃弧，或在小于正常起弧电流下持续燃弧，或两者同时出现的一种现象。

(8) 膜击穿(film breakdown)：加在触头间的电压达到某一值以上时，造成的触头表面膜击穿。膜击穿时将出现接触电阻急剧下降的现象。

(9) 触头电侵蚀(contact electrical erosion)：触头工作过程中，由于相互间发生的热和电的作用而伴随出现的金属液桥、电弧和火花放电等现象所引起的触头损失。

(10) 粘着(adhesion)：触头接触面发生粘附致使触头分断困难的现象。

(11) 熔焊(welding)：由于电弧放电和焦耳热的影响，致使触头接触面熔化、凝结，造成触头不能正常断开的现象。熔焊分为触头闭合后由于焦耳热的作用而产生的静熔焊和触头开闭过程中受电弧和焦耳热以及弹跳等的影响而产生的动熔焊。

(12) 冷焊(cold welding)：触头闭合后，由于接触表面金属原子间引力的相互作用而使触头不能正常断开的现象。

(13) 最小起弧电压(minimum arcing voltage)：发生电弧的临界电压，低于这个电压值时，即使电流再大也不会发生电弧。

(14) 最小起弧电流(minimum arcing current)：发生电弧的临界电流，低于这个电流值时，即使电压再高也不会发生电弧。

(15) 重燃(reignition)：触头分断过程中，电流过零后四分之一工频周期内，机械开关电器触头之间重新出现电流的现象。

(16) 重击穿(restrike)：触头分断过程中，电流过零后四分之一工频周期或更长的时间内，机械开关电器触头之间重新出现电流的现象。

(17) 触头温升(contact temperature rise)：在规定条件下，触头温度与周围环境温度之差值。

(18) 触头电寿命(contact electrical durability)：在规定

条件下，机械开关电器触头不需修整或更换的负载操作循环次数。

(19) 截流值(chopping current)：交流电流自然过零点前突然降至零的转折点的瞬时值。

(20) 燃弧时间(arcing time)：从触头起弧瞬间至电弧完全熄灭的间隔时间。

1.3 材料技术及主要元素的物理性能

1.3.1 材料技术

(1) 合金内氧化(internal oxidization)：将合金在含氧气氛中加热，使氧扩散到合金内部进行选择性氧化，并在母体中形成氧化物的一种工艺。

(2) 单面内氧化(single-face oxidization)：对合金片材进行内氧化处理时，主要从片材的一面进行氧化反应的工艺。

(3) 双面内氧化(double-face oxidization)：对合金片材进行内氧化处理时，主要从片材的两面进行氧化反应的工艺。

(4) 预氧化法(pre oxidization)：将合金颗粒或碎块等先进行内氧化处理，再加工成触头产品的工艺。

(5) 固相扩散(solid state diffusion)：固态物质中由于物质浓度或化学位梯度所造成的物质原子宏观迁移过程。

(6) 预烧骨架(skeleton presistering)：将高熔点的金属粉末坯块进行预烧结制成骨架的工艺。

(7) 浸渍(impregnation)：用非金属物质(如油、石腊或树脂)填充烧结体孔隙的一种工艺。

(8) 熔渗(infiltration)：用熔点比骨架熔点低的金属或合金，在高于该金属或合金熔点的温度下，通过孔隙的毛细管作用，充填未烧结的或烧结的多孔体骨架孔隙而得到致密制品的工艺。

(9) 浸没熔渗(infiltration by dipping)：将金属粉末压制后预烧或未烧结的多孔体骨架全部浸没到比多孔体骨架材料熔点低的液态金属中进行的熔渗。

(10) 叠层熔渗(infiltration by overlay)：用熔点比骨架熔点低的金属或合金置于金属粉末压制后预烧结或未烧结的多孔骨架上面或下面进行的熔渗。

(11) 脱碳(decarbonization)：将含石墨的银基触头产品在含氧气氛中进行加热，使其一面石墨烧损，形成“可焊层”的工艺。

(12) 氧化物稀薄区(oxide depletion zone)：因内氧化法造成的触头中氧化物浓度偏低的区域。

(13) 材料转移(material transfer)：触头接触面受放电和焦耳热的影响，一方触头的部分材料向另一方触头迁移的现象。

(14) 桥式材料转移(bridge material transfer)：触头分断过程中，熔融金属桥非对称折断，从而使一方触头重量增加，另一方触头重量减少的一种材料转移。

(15) 针状材料转移(needle material transfer)：在触头表面形成一种直径较小而长度较长的堆积物的材料转移。

1.3.2 主要元素的物理性能

电触头材料所用的主要元素的物理性能见表 4.1-1。

表 4.1-1 电触头材料所用主要元素的物理性质

元素符号	元素名称	密度(20℃)(10^3kg/m^3)	熔点(℃)	沸点(℃)	比热容(20℃)[4.186 8×10^3 J/(kg·℃)]	熔解热(4.186 8×10^3J/kg)	导热系数[418.68W/(m·℃)]	线胀系数(0～100℃)(10^{-6}℃$^{-1}$)	电阻系数(18℃)(10^{-8}Ω·m)	电阻温度系数(0℃)(10^{-3}℃$^{-1}$)	磁化率(18℃)(10^{-6})	弹性模量(9.807MPa)	元素符号
Ag	银	10.49	960.8	2210	0.055 9	25	1.0	19.7	1.59	4.29	−0.181 3	7000～8200	Ag
Au	金	19.32	1063	2966	0.031 2	16.1	0.71	14.2	2.065	3.5	−0.142	7900～8000	Au
Bi	铋	9.80	271.2	1420	0.029 4	12.5	0.020	13.4	106.8	4.2	−1.35	3234	Bi
C	碳	2.25(石墨)	3727	4830	0.165	—	0.057	0.6～4.3	1375	0.6～1.2	−0.49	490	C
Cd	镉	8.65	321.03	765	0.055	13.2	0.22	31.0	7.51	4.24	−0.182	5350	Cd
Ce	铈	6.90	804	3468	0.042	8.5	0.026	8.0	75.3(25℃)	0.87	+17.5	3060	Ce
Co	钴	8.9	1492	2870	0.099	58.4	0.165	12.4	5.06(α)	6.6	铁磁性(α)	21 400	Co
Cr	铬	7.19	1903	2642	0.11	96	0.16	6.2	12.9	2.5	+2.65	25 900	Cr
Cu	铜	8.96	1083	2580	0.092	50.6	0.94	17.0	1.67～1.68(20℃)	4.3	−0.086	11 700～12 650	Cu
Fe	铁	7.87	1537	2930	0.11	65.5	0.18	11.76	9.7(20℃)	6.0	铁磁性	20 000～21 550	Fe
In	铟	7.31	156.61	2050	0.057	6.8	0.057	33.0	8.2	4.9	−0.11	1070～1125	In
Ir	铱	22.4	2443	5300	0.032 3	—	0.14	6.5	4.85	4.1	+0.133	52 500～53 830	Ir
Mo	钼	10.22	2625	4800	0.66	69.8	0.34	4.9	5.17	4.71	+0.04	32 200～35 000	Mo
Nd	钕	7.00	1024	3180	0.045	11.78	0.031	7.4	64.3(25℃)	1.64	+36	3865	Nd
Ni	镍	8.90	1453	2732	0.105	73.8	0.22	13.4	6.84	5.0～6.0	铁磁性	19 700～22 000	Ni
O	氧	1.429×10^{-3}	−218.83	−182.97	0.218	3.3	59×10^{-6}	—	—	—	+106.2	—	O
Pd	钯	12.16	1552	3980	0.058 4	3.42	0.168	11.8	9.1	3.79	+5.4	11 280～12 360	Pd
Pt	铂	21.45	1769	4530	0.032 4	26.9	0.165	8.9	9.2～9.6	3.99	+1.1	15 470～17 000	Pt
Sn	锡	7.298	231.91	2690	0.054	14.5	0.150	23	11.5	4.4	−0.40	4150～4780	Sn
W	钨	19.3	3380	5900	0.034	44	0.397	4.6(20℃)	5.1	4.82	+0.284	35 000～41 530	W
Zn	锌	7.134(25℃)	419.505	907	0.092 5	24.09	0.27	39.5	5.75	4.2	−0.157	9400～13 000	Zn
Zr	锆	6.507	1852±2°	3580	0.068	60	0.211(25℃)	5.85	39.7～40.5	4.35	−0.45	7980～9770	Zr

2　轻负载电触头材料

轻负载电触头是指用于电子信息技术领域及控制、测量、调节系统中的工作电压小于 30V、电流小于 60A 的电触头。这类电触头所用的材料主要是金基、铂基、钯基、银基等合金材料。轻负载电触头材料主要品种见表 4.1-2。

表 4.1-2　　轻负载电触头材料主要品种

类　别	材　料　品　种
银及银合金	纯银、银镍（细晶银）、银铜、银钯、银镁镍
金基合金	金银、金银铜、金镍、金铬、金钴、金银镍、金银铂
铂族合金	铂铱、钯铱、钯铜、钯银铜、铂金、铂镍
钨及钨合金	钨、钨铜

2.1　银及银合金

2.1.1　银及银合金轻负载电触头材料的成分与物理性能

银及银合金轻负载电触头材料的成分与物理性能见表 4.1-3。

表 4.1-3　　银及银合金的成分与物理性能

材料品种	牌　号	熔点（℃）	密度（g/cm³）	电阻率（μΩ·cm）	布氏硬度（HB）
纯银	Ag	961	10.49	1.59	35～50
细晶银	AgNi(0.15)	960	10.50	—	—
银铜	AgCu(3)	—	10.4	1.92	≥45
	AgCu(5)	—	10.4	1.96	≥55
	AgCu(10)	778	10.3	2.00	≥60
	AgCu(28)	—	10.1	2.08	≥100
	AgCu(50)	778	9.7	2.10	≥75
银钯	AgPd(60)	1330	11.0	42.0	≥52
	AgPd(50)	1290	10.9	31.0	≥42
	AgPd(20)	1070	10.7	10.1	≥35
	AgPd(10)	1000	10.6	5.9	≥30
	AgPd(5)	975	10.5	3.8	≥26
银镁镍	Ag(Mg+Ni)(0.5)	960	10.5	2.32	40～170

（1）银是一种低熔点、小密度、易加工、导电导热性能最好的贵金属。在室温，Ag 的热导率比 Cu 和 Au 约高 1/3，比 Pt 和 Pd 约高 6 倍，其热扩散率也远高于相同温度下其他贵金属和 Cu 的热扩散率。

400℃退火态高纯 Ag 在室温下的电阻率为1.59μΩ·cm，按国际退火 Cu 电导率的标准(IACS)，当高纯退火态 Cu 的标准电导率为 100%时，高纯退火态 Ag 的电导率为 108.4%IACS。Ag 从低温到熔点(固态)的电阻率呈近似线性趋势上升；在熔化温度由固态转变为液态，Ag 的电阻率由 8.40μΩ·cm 急剧增大到 16.6μΩ·cm；随液态温度的升高，Ag 的电阻率继续增大。合金元素对 Ag 的电阻率有明显的影响，如图 4.1-1 所示。

纯银作为电触头材料使用时，电烧损严重，变形大，Ag 极易从阳极迁移并在阴极形成树枝状晶体沉淀物，引起电触头间的粘接和熔焊。因此，通过添加合金元素，可以显著地改善银基电触头材料的抗熔焊性。常用的银基合金有细晶银[AgNi(0.15)]、银铜、银钯、银镁镍等。

在纯银中加入微量的 Ni 和/或 Mg，通过控制熔化和浇铸

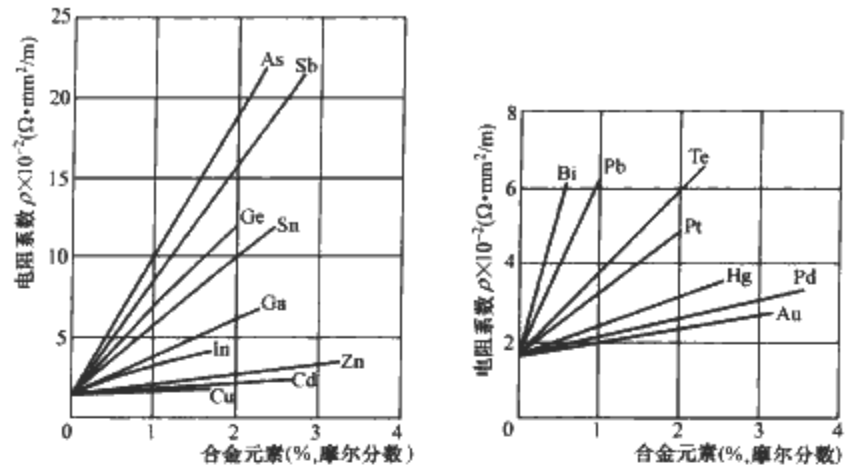


图 4.1-1　合金元素对 Ag 的电阻率的影响

过程，可得到使冷却和凝固时析出的 Ni 和 Mg 在组织上呈细晶态分布的银镍合金或银镁镍合金。析出的细晶态分布 Ni 和/或 Mg 在使 Ag 提高硬度和强度的同时，也明显提高银合金的软化温度和再结晶温度；弥散分布的细晶 Ni 和/或 Mg 还能有效地阻止合金再结晶后期出现的晶粒长大，使银镍合金或银镁镍合金经长时间再结晶处理后，仍具有细晶组织。

（2）银铜合金与纯银相比具有较好的力学性能、耐磨性和抗熔焊性，易氧化和变色，接触电阻大等特点。银铜合金是由 2 个边端固溶体形成的简单共晶系合金，一般在真空中频感应炉或高频感应炉中采用石墨干锅熔炼制造，其相图见图 4.1-2。在室温，Ag 与 Cu 的相互固溶度非常小，富 Ag 和富 Cu 的银铜合金有明显的时效硬化效应，因此，Cu 是 Ag 的有效强化元素。

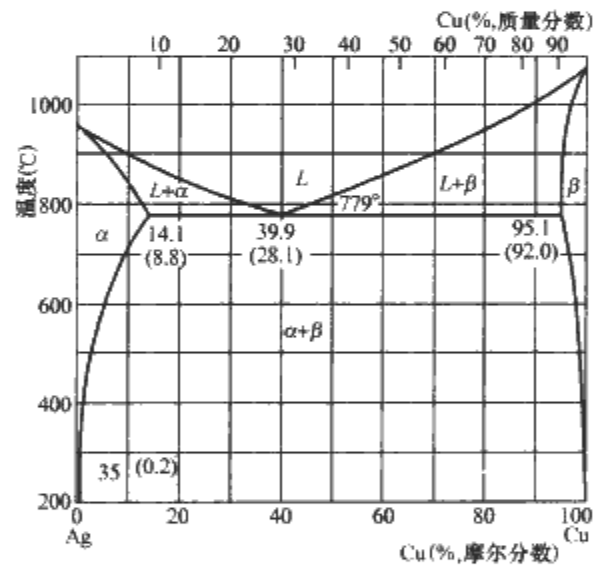


图 4.1-2　银铜合金相图

（3）银钯合金为连续固溶体，其相图见图 4.1-3。添加少量 Pd 制成的银钯合金(AgPd1、AgPd3、AgPd5)，既能

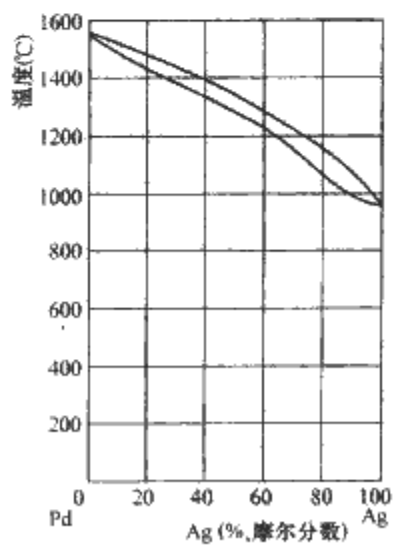


图 4.1-3　银钯合金相图

提高机械性能，又能明显降低材料迁移，而对其电导率却没有不良影响。富 Pd 的银钯合金具有良好的抗氧化性，在高温，随着 Pd 含量的增加，银钯合金的抗氧化性亦随之提高。但富 Pd 的银钯合金容易受到有机气氛的污染，且其电导率也会随之明显下降。通过添加其他元素形成的银钯三元合金、银钯四元合金（如 AgPd30Cu5、AgPdAuNi），在进一步提高机械性能的同时，可明显地改善银钯合金的电气性能。常用的添加元素有金、铜、镍、锆、钽、铼、钨等。

2.1.2 银及银合金轻负载电触头材料的电气性能和用途

银及银合金轻负载电触头材料的电气性能和用途列于表 4.1-4 中。

表 4.1-4 银及银合金轻负载电触头材料的电气性能和用途

触头品种	性能特点	应用场合
纯银	导电性能好，表面不易氧化，加工性能良好，特别适用于各种焊接覆层材料，是最便宜的贵金属，但在硫作用下生成硫化银，通过电流时易汽化，抗熔焊较差，易冷熔焊，直流电流下易发生材料转移，硬度较低，耐磨损性较差	在小电流电器技术领域中获得广泛使用
细晶银 AgNi(0.5)	在接触电阻几乎相同的条件下，其强度与耐热性能优于纯银	在较高工作温度下，取代银作为触头材料
银铜合金 AgCu(3) AgCu(10) AgCu(20) AgCu(28)	机械强度、耐损蚀性及抗熔焊性能比纯银好；在通断过程中因氧化而使其接触电阻比银高；对硫敏感，含铜量高时加工困难，熔化温度低于银	广泛用作继电器与开关触头、极化继电器的簧片、微电机的换相器和旋转开关等滑动触头
银钯 (AgPd)	比纯银的抗硫化、耐损蚀性能好；硬度高、材料迁移比银小；当含钯（质量分数）在 50% 左右时电损蚀最小，大于 50% 时抗硫化能力增强，含钯（质量分数）40% 时硬度与电阻率最高；价格比银高，电阻率也较高	广泛应用于电信技术中，特别是在电话继电器和现代化旋转式选择器中，Ag Pd50 特别适用于精密电位器，Ag Pd60 常用作电位计的滑动电阻线

2.2 金基合金

2.2.1 金基合金轻负载电触头材料的成分与物理性能

金基合金轻负载电触头材料的成分与物理性能见表 4.1-5。

表 4.1-5 金基合金轻负载电触头材料的成分与物理性能

材料品种	牌号	熔点 (℃)	密度 (g/cm^3)	电阻率 ($\mu\Omega \cdot cm$)	布氏硬度 (HB)
金	Au	1064	19.32	2.06	—
金银	AuAg(30)	1025	16.60	10.40	≥32
	AuAg(90)	965	11.40	3.60	≥29
金银铜	AuAg(35)Cu(5)	950	14.30	12.00	165～220
金镍	AuNi(5)	1000	18.30	12.30	≥99
金锆	AuZr(3)	1045	18.30	20.00	≥120
金钴	AuCo(5)	1010	18.20	55.00	95～150

（1）Au 是最稳定的金属，在空气或水中（甚至在高温下）不氧化，抗有机污染；Au 也是最软的金属，退火态 99.995%（质量分数）的纯金硬度仅为 25HV，抗拉强度为 130MPa，通常采用合金化的方法，添加 Ag、Co、Cu、Ni、Pd、Pt 等元素来提高 Au 的强度性质。

Au 的导电性仅次于 Ag、Cu。Au 在 0℃的电阻率 $\rho_0 = 2.06\mu\Omega \cdot cm$，且 Au 的电阻率（$\rho_t$）和电阻比（$R_t/R_0$）是温度的复杂函数，在 3～7K 低温时，Au 的电阻率最低，在 25℃时的电阻率比 4.1K 时的电阻率高 300 倍以上；达到熔点温度时 Au 的电阻率 $\rho_m = 13.68\mu\Omega \cdot cm$，是 20℃时 ρ 值的 6.44 倍，熔化后电阻率再提高 2.88 倍。合金元素对 Au 的电阻率的影响见图 4.1-4，由此可见，Co、Fe、Nb、Ti、V 等元素可较明显地提高 Au 的电阻率，而 Ag、Cu、Pd 等元素对 Au 的电阻率的影响较小。

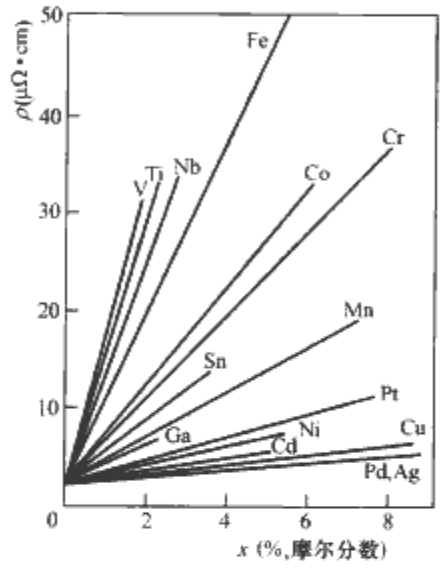


图 4.1-4 合金元素对 Au 的电阻率的影响

纯 Au 由于弹性差、屈服点低、伏安特性差、熔化电压与起弧电压接近等特性，一般只用于制作接触压力小而电压很低（$I=1\sim10$uA，$V=1\sim50$mV）的精密触点；Au 触点在含有有机蒸汽的环境中使用时，会生成含碳的沾积物，使其接触电阻升高至数欧姆。

（2）AuAg 合金比纯 Au 具有较高的硬度和抗粘接性，含 10%～70%Ag 的 AuAg 合金具有良好的导电、导热性和耐腐蚀性，以及抗硫化性能，主要用于制作强腐蚀介质中高可靠性要求的轻负荷触点。Au 与 Ag 在液态和固态无限互溶，其相图见图 4.1-5。AuAg 合金通常采用真空中频感应炉石墨或氧化铝坩锅熔炼，各种成分的合金炉料均按银、回炉料、Au 的顺序在封炉前同时装入。全部炉料熔化后，需精炼除气，在高于合金熔

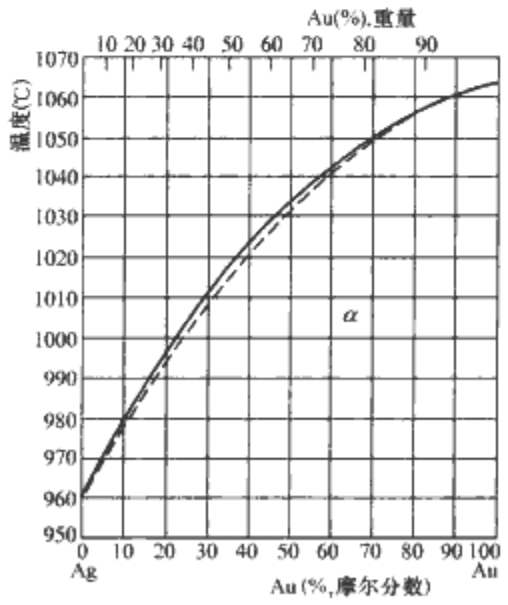


图 4.1-5 AuAg 合金相图

点 100～200℃条件下浇铸于铁模之中。铸锭采用冷轧开坯，两次退火间的冷加工总变形量可达 80%～90%，道次变形量应控制在 15%～20%。退火温度为 500～650℃。

AuAg 合金的抗硫化性能与 Ag 的含量有关，在 60℃、H_2S 在 12kPa 条件下，AuAg 合金硫化物的形成和接触电阻的关系见图 4.1-6。

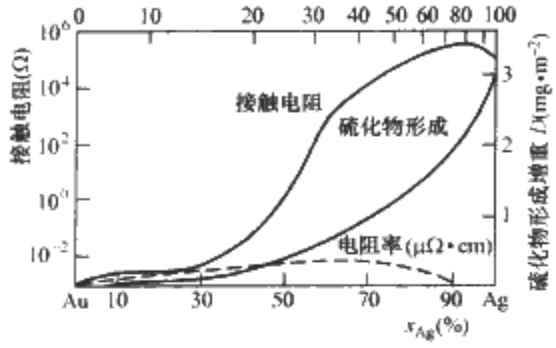


图 4.1-6　Ag 含量对 AuAg 合金硫化物的形成和接触电阻的影响

为了进一步改善 AuAg 合金的物理和力学性能，常添加 Cu、Ni、Pt 等元素形成 AuAgCu、AuAgNi、AuAgPt 等三元合金。AuAg(35)Cu(5)合金常用来代替 PtIr(10)合金，除用于制作轻负载电触头外，还可用于制作电位器绕组、导电环等；AuAg(26.2)Ni(1.8)合金具有良好的抗熔焊性和抗金属转移能力，一般用于制作要求高可靠性而电流＜0.5A 的轻负载电触头；AuAg(25)Pt(6)合金具有良好的耐磨性，常用于制作要求高可靠性的通讯系统继电器用轻负载电触头。

(3) AuNi 合金系相图示于图 4.1-7，AuNi 合金在固相线以下和 850℃以上存在连续固溶体区间，合金从高温缓冷或对高温淬火态合金进行时效处理时，单相过饱和固溶体将被分解，形成富 Au 固溶体和富 Ni 固溶体。图 4.1-8 为 AuNi 合金时效处理硬化效果。AuNi 合金一般采用氧化铝坩锅或石墨坩锅在真空电阻炉或真空中频感应炉熔炼，合金液体加热到高于凝固点 150～200℃时浇入水冷铜模、铸铁模或石墨模中，合金凝固后应立即淬火冷却。

为了进一步提高 AuNi 合金的强度和耐磨性，可通过添加 Cu、Gd、Y 或其他过渡金属，产生固溶强化和沉淀强化效应，形成 AuNiCu、AuNiGd、AuNiY 等三元合金。AuNi、AuNiCu、AuNiGd、AuNiY 常用于制作要求抗粘接的轻负载触点。

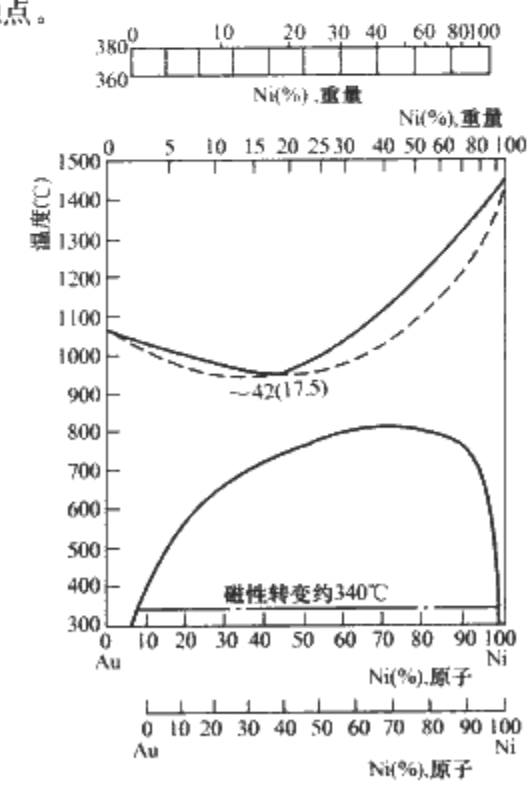


图 4.1-7　AuNi 合金系相图

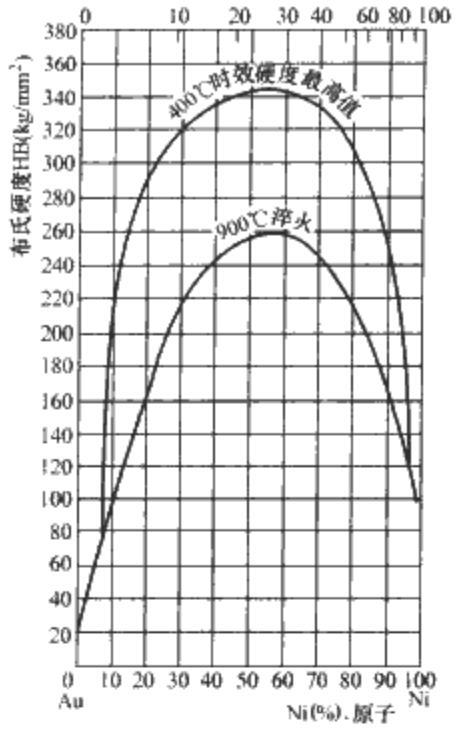


图 4.1-8　AuNi 合金时效处理硬化效果

2.2.2　金基合金轻负载电触头材料的电气性能和用途

金基合金轻负载电触头材料的电气性能和用途列于表 4.1-6 中。

表 4.1-6　金基合金轻负载电触头材料的电气性能和用途

触头品种	性能特点	应用场合
金与金合金 金(Au) 金银(AuAg) 金镍(AuNi) 金银铜 (AuAgCu)	耐腐蚀性优良，即便在接触压力较小时，其接触可靠性也较高。金中添加镍可提高抗熔焊性、硬度与机械强度，可降低材料转移，金与银的合金可克服纯金触头容易粘着的缺点。价格很高，金的再结晶温度低，硬度也低，容易引起粘着。在大电流条件下耐损蚀性能差。金镍易形成氧化膜，金银的抗熔焊性能差	金常被用作专用静触头和开闭频率低、可靠性高的触头以及作为电镀或覆层材料用于接插件和小型继电器的接触件上，金银多用作小型继电器触头，金银铜适宜作滑动触头，金镍和金银镍合金可用作电刷和集电环材料

2.3　铂族合金

铂族元素由 Ru、Rh、Pd、Os、Ir、Pt 构成，它们有着相似的原子、离子半径和相似的物理化学性质。由于它们都含有较多的电子和未完全充满的 d 电子层，加之 d 电子对原子核正电荷起着有效的屏蔽作用，所以外层电子基本不受原子系数增加的影响，d 电子能够参与化学反应并导致形成多种价态的化合物。另外，铂族金属都有较高的电阻率，可能是由于铂族元素的 d 层电子不仅不参加电传导，而且还对传导电子产生 d-s 散射作用所致。

2.3.1　铂族合金轻负载电触头材料的成分与物理性能

铂族合金轻负载电触头材料的成分与物理性能见表 4.1-7。

表 4.1-7　铂族合金轻负载电触头材料的成分与物理性能

材料品种	牌　号	溶点(℃)	密度($g \cdot cm^{-3}$)	电阻率($\mu\Omega \cdot cm$)	布氏硬度(HB)
铂	Pt	1768	21.45	9.847	—
铂铱	PtIr(10)	1780	21.6	24.5	≥94
	PtIr(15)	1790	21.6	27.0	≥130
	PtIr(20)	1815	21.7	30.0	≥183
	PtIr(25)	1840	21.7	33.0	≥213
	PtIr30)	1890	21.8	35.0	≥244

续表

材料品种	牌 号	熔点(℃)	密度(g/cm³)	电阻率(μΩ·cm)	布氏硬度(HB)
钯	Pd	1552	12.16	9.1	—
钯铱	PdIr(10) PdIr(18)	1580 1610	12.6 13.0	27.0 33.0	≥120 ≥198
钯铜	CuPd(60)	1200	10.4	35.0	≥86

2.3.1.1 铂基合金

(1) 纯铂(工业用 99.95%Pt)具有优良的耐氧化、耐硫化和耐盐水腐蚀能力，其熔点高，蒸汽压低，耐磨性好，且在较宽的温度范围内具有低而稳定的接触电阻。但在有机气氛中易生成"褐粉"使接触电阻增大。纯铂在 700℃退火后，硬度仅为 37～42HV，冷加工变形和合金化可以提高铂合金的硬度。合金元素对 Pt 的硬度的影响见图 4.1-9。合金元素对 Pt 的电阻率的影响见图 4.1-10。

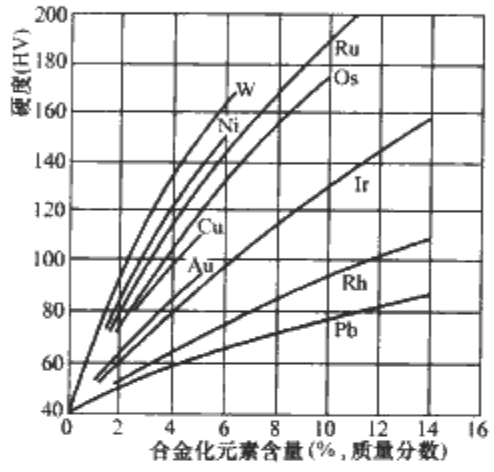


图 4.1-9 合金元素对 Pt 的硬度的影响

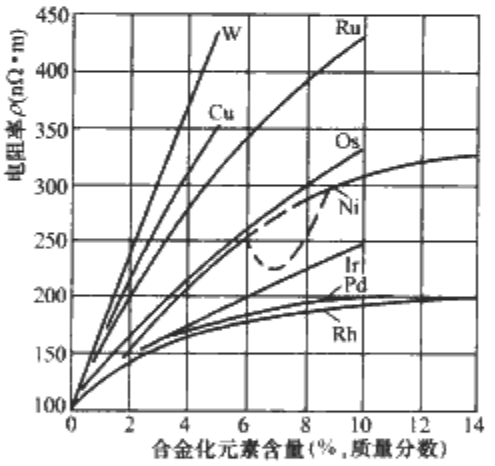


图 4.1-10 合金元素对 Pt 的电阻率的影响

(2) PtIr 合金在高温时为连续固溶体，在 975～700℃范围内将缓慢地离析为两种固溶体，其相图如图 4.1-11 所示。Ir 的加入可显著提高 Pt 的抗化学腐蚀能力，PtIr(10)合金的化学腐蚀速度仅为纯 Pt 的 60%左右。由于 Ir 在空气中加热时其氧化挥发损失比 Pt 大许多倍，因此，PtIr 合金在空气中加热时也会发生明显的氧化挥发损失，且随 Ir 含量的增加及加热温度的升高，其氧化挥发损失加大。

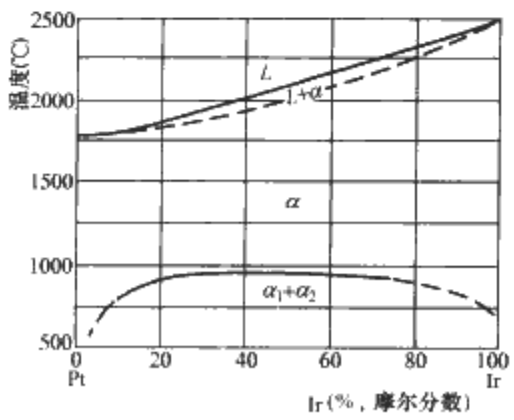


图 4.1-11 PtIr 合金相图

PtIr 合金通常采用真空高频/中频感应炉或惰性气体保护熔炼。熔炼时应先将 Pt 熔化，然后加 Ir，在高于凝固点 150～200℃的温度下浇注于水冷铜模中。为了消除合金晶内偏析及树枝状组织的影响，PtIr 合金一般均需先进行热锻或热轧开坯，然后进行冷加工。冷加工率对 PtIr 合金硬度的影响见图 4.1-12。

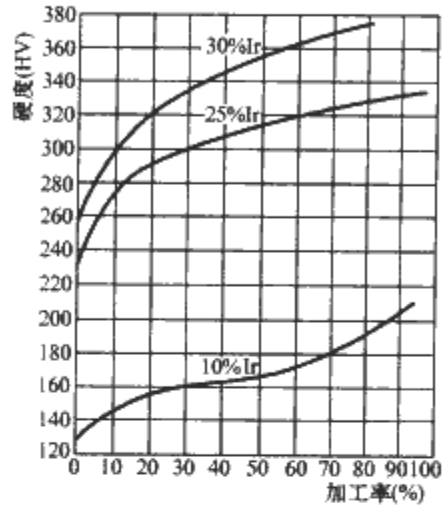


图 4.1-12 冷加工对 PtIr 合金硬度的影响

(3) 其他铂基合金电触头材料的主要性能列于表 4.1-8 中。Ru 含量≤14%的 PtRu 合金电触点一般用于中等负荷或重负荷电器开关，可代替 PtIr 合金。PtRh(5)和 PtRh(10)合金常用作航空工业的电器触点和火花塞电极。Ni 含量≤10%的 PtNi 合金可用于制作开关电器触点和电刷。PtAu(5)和 PtAu(10)合金常用作轻负荷继电器和开关触点。PtPd(10)和 PtPd(20)合金主要用作开关触点和滑环。

表 4.1-8 PtRu 等合金电触头材料的主要性能

材料品种	牌 号	熔点(℃)	密度(g/cm³)	电阻率(μΩ·cm)
铂钌合金	PtRu(5)	—	20.67	31.5
	PtRu(10)	—	19.94	43
	PtRu(14)	1843	19.06	46
铂铑合金	PtRh(5)	1840	20.8	—
	PtRh(10)	—	20.1	19.2
铂镍合金	PtNi(5)	—	20.1	22.8
	PtNi(8)	1740	19.2	—
	PtNi(10)	1710	18.9	29.8
铂金合金	PtAu(5)	1740	21.4	—
	PtAu(10)	1710	21.2	—
铂钯合金	PtPd(10)	1550	19.9	—
	PtPd(20)	1560	18.6	—

2.3.1.2 钯基合金

(1) Pd 为银白色金属，在铂族金属中，Pd 的熔点最低，密度最小，导电导热性接近 Pt。Pd 的化学稳定性比 Pt 差，会被有机气氛污染，在表面形成有机聚合物"褐粉"，使接触电阻迅速升高。但是，Pd 具有良好的抗硫化能力，即使在 800～1000℃条件下，在 H_2S 气氛中裸露 1h，其质量也不会发生明显的变化。Pd 吸收氢的能力很强，Pd 溶解氢后，其密度、导电性和抗拉强度随氢含量的增加而降低，但当将已吸收至氢饱和的 Pd 在真空中加热到 300℃时，氢可以除去。

Pd 及其合金由于大量吸气，一般需采用中频或高频感

应炉真空充氩保护熔炼。铸态工业用纯 Pd(99.85%)的硬度约为 44～50HV。Ag、Ir、Cu、Mo、Ni、Ru 等合金元素对 Pd 的硬度、强度、电阻率的影响示于图 4.1-13、图 4.1-14、图 4.1-15 中。

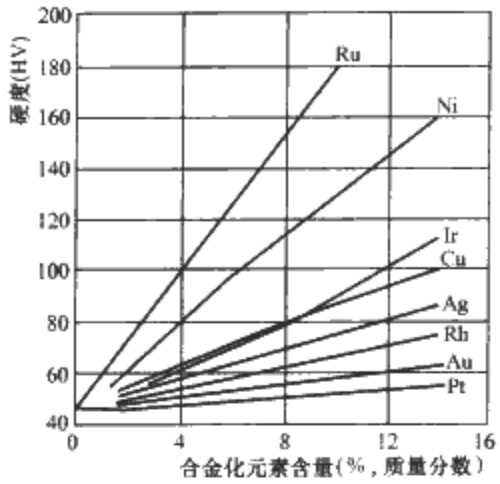


图 4.1-13　合金元素对 Pd 的硬度的影响

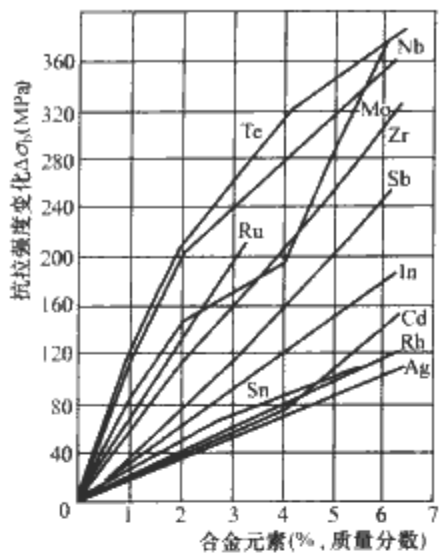
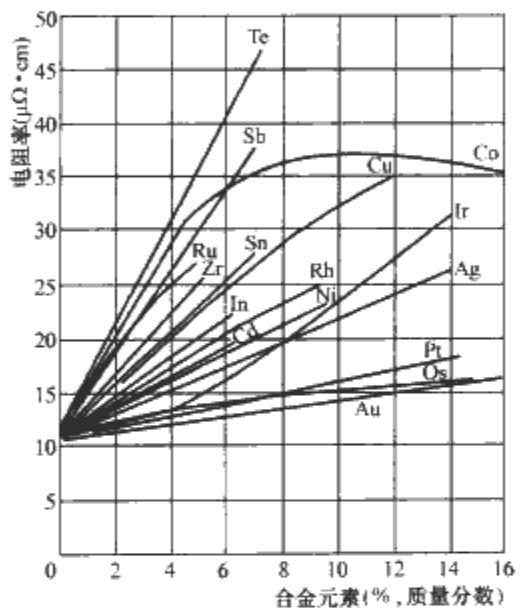


图 4.1-14　合金元素对 Pd 的强度的影响



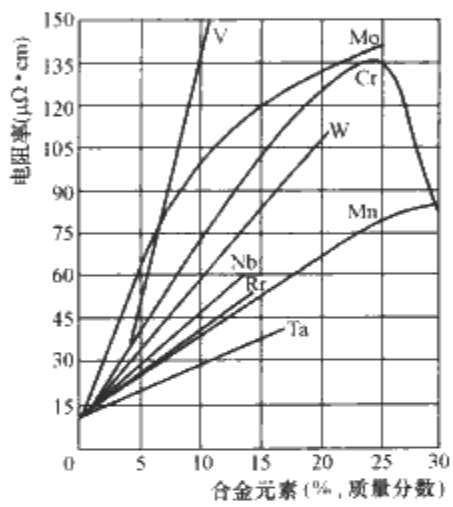


图 4.1-15　合金元素对 Pd 的电阻率的影响

(2) 钯铱合金。PdIr 合金在高温形成连续固溶体，图 4.1-16 是 PdIr 合金相图。由图可见，含 50%～59%Pd(质量分数)的合金，在 1480℃附近发生固溶体分解，生成钯基固溶体(α 相)和铱基固溶体(β 相)。表 4.1-9 列出了 PdIr(10)和 PdIr(18)合金电触头材料的主要物理性能。PdIr(10)和 PdIr(18)一般采用中频或高频感应炉真空充氩保护熔炼，其冷热加工条件示于表 4.1-10 中。PdIr 合金电触头材料主要用作恶劣环境下使用的电触点，在一定条件下可以替代 PtIr 合金。

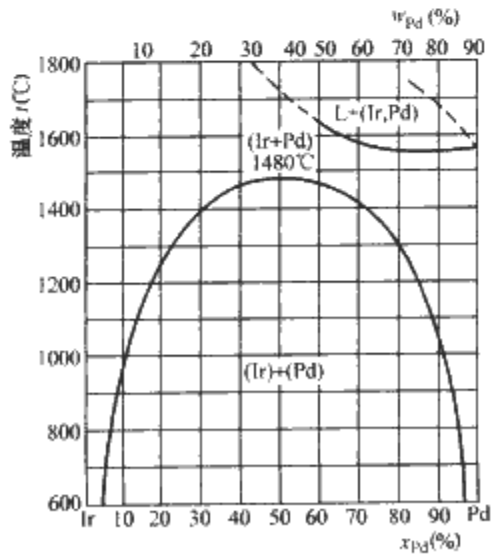


图 4.1-16　PdIr 合金相图

表 4.1-9　PdIr(10)和 PdIr(18)合金主要物理性能

合金	熔点(℃)	密度(g/cm^3)	电阻率(μΩ·cm)	硬度		抗拉强度(MPa)	伸长率(%)
				HV	HB		
PdIr(10)	1650	12.6	260	125	125	368	30
PdIr(18)	1750	13.5	351	—	195	607	—

表 4.1-10　PdIr(10)和 PdIr(18)合金冷热加工条件

热加工			冷加工			
热锻温度(℃)	热锻总加工率(%)	终锻温度(℃)	道次加工率(%)	退火间总加工率(%)	退火温度(℃)	退火保温时间(min)
1100～1250	>60	800～900	约 10	60～90	850～900	约 20

注　退火在真空或氩气保护下进行。

(3) 钯铜合金，PdCu 合金在高温时形成连续固溶体，在低温下将出现有序无序转变。图 4.1-17 给出了 PdCu 合金相图。PdCu(40)合金常用作弱电触头材料。PdCu(40)合金采用氧化铝坩锅真空熔炼，在有序无序转变温度以上淬火后能够进行冷加工。道次加工率约为 10%，两次退火间的总加工率不超过 70%，退火温度为 920℃左右，退火时间达20～30min。

(4) 其他钯基合金电触头材料的主要性能列于表 4.1-11 中。

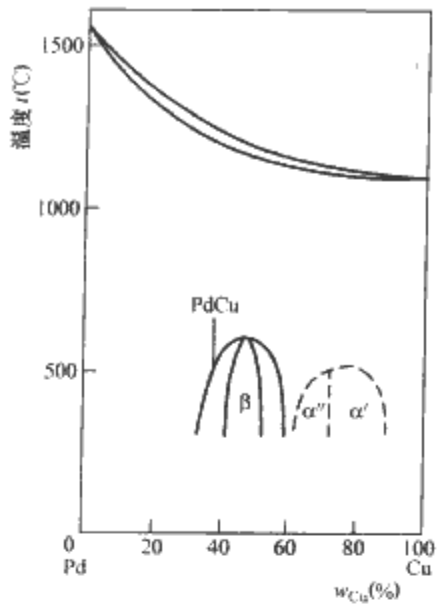


图 4.1-17 PdCu 合金相图

表 4.1-11 其他钯基合金电触头材料的主要性能

材料品种	牌号	固相线温度(℃)	密度(g/cm^3)	电阻率($\mu\Omega \cdot cm$)	电导率(%)IACS
钯银铜合金	PdAg(20)Cu(30)	1150	10.0	—	6.3
	PdAg(30)Cu(20)	1066	10.6	—	5.0
	PdAg(30)Cu(30)	1066	10.6	—	5.0
钯银钴合金	PdAg(35)Co(5)	—	11.1	40.8	—
钯银金合金	PdAg(30)Cu(14)Au(10)Pt(10)Zn	1085	11.9	33.0	—
	PdAg(30)Au(10)Pt(5)	1371	12.5	39.4	—
钯钌合金	PdRu(10)	1580	12.0	43	4.0

2.3.2 铂族合金轻负载电触头材料的电气性能和用途

铂族合金轻负载电触头材料的电气性能和用途列于表 4.1-12 中。

表 4.1-12 铂族合金轻负载电触头材料的电气性能和用途

触头品种	性能特点	应用场合
铂与铂合金 铂(Pt) 铂铱(RtIr)	具有低的蒸汽压、优良的耐损蚀性(包括抗氧化性)、抗熔焊性，接触电阻稳定，硬度较高，耐磨性好。含铱(质量分数)30%以下时容易加工。价格贵，极易与有机气氛作用而使接触电阻升高，在开闭频繁的条件下，在干电路上会生成聚合物，在湿电路上则易引起活化	广泛应用于高可靠性通信或开闭频繁的轻负载触头，如十字开关、拨号盘开关、电话继电器以及强腐蚀条件下的精密触头，如航空电器、高灵敏度电位器等
钯与钯合金 钯(Pd) 钯铜(PdCu40) 钯铱(PdIr)	耐损蚀性能好，直流时材料转移小。在低的接触压力下具有极低的接触电阻、抗熔焊、寿命高等特点。但价格贵，在有机蒸汽的作用下将生成聚合物而使接触电阻增高。含铜量较高时，由于稳定的氧化物而使接触电阻增大	用作汽车信号装置的继电器触头，在高电压、小电流和开闭频繁的场合，PdCu40 合金与钨配对使用，在高接触压力的场合适宜用作滑动触头

2.4 轻负载电触头材料的选用原则

轻负载电触头材料的选用原则示于表 4.1-13 中。

表 4.1-13 轻负载电用触头材料的选用原则

工作条件	选用材料
直流下使用	因直流下材料转移比交流下严重，故可选用热导率不同的两种材料分别制成阳极和阴极触头，并以热导率高的材料作阳极，以防止材料从阳极向阴极的正向转移
有电感的回路中或触头运动速度快的场合	分断时将出现高的电压峰值，电压越高，转移与电损蚀越大，此时应选用转移与电损蚀小的触头材料
条件不许可提高接触压力时	贵金属合金
触头最大间隙受条件限制不能增大时	灭弧能力较好的材料
高湿度下使用	耐腐蚀性能好的铂基、钯基、金基、银基合金等
硫化气氛中	耐腐蚀能力较强的铂基合金或钯基合金

3 低压电器用电触头材料

低压电器用电触头是指用于工作电压小于 1200V、电流为 6～2500A、接通和分断电流可达 10kA 电器中的电触头。这类电触头所用材料主要是银基、铜基复合触头材料。常用低压电器用电触头材料的品种列于表 4.1-14 中。

表 4.1-14 低压电器用电触头材料的品种

类别	品种
银基复合触头材料	细晶银、银镍、银石墨、银铜、银铁、银氧化镉、银镍石墨、银钨、银钼、银碳化钨、银氧化锡、银氧化锡铟、银氧化锌、银氧化铜、银碳化钨镍石墨
铜基复合触头材料	铜石墨、铜碳化钨、铜钨

3.1 低压电器用银基电触头材料

低压电器用银基电触头材料是以第二相强化质点弥散分布于 Ag 基体中的一种复合材料，主要有：以纯金属作为弥散强化相的 Ag—Ni、Ag—Fe、Ag—W、Ag—Mo 等 Ag—金属复合材料；以氧化物作为弥散强化相的 AgCdO、AgZnO、$AgSnO_2$ 等 Ag—氧化物复合材料；以石墨作为弥散强化相的 Ag—C 复合材料。表 4.1-15 列出了常用银基电触头材料的成分与物理性能。

3.1.1 纯金属弥散强化银基电触头材料

Ni、Fe、W、Mo 等金属元素在液态 Ag 中只能有限溶解或不溶，在固态下与 Ag 几乎都不相溶，因此，将其加入 Ag 中可以显著地提高材料的硬度和强度、改善电触头的抗电蚀性和抗变形性。这类材料通常使用粉末冶金方法制备，其工艺流程是采用机械混粉、共沉淀等方法制备混合粉末，再经压制成型、烧结、精整等制成。

3.1.2 氧化物弥散强化银基电触头材料

3.1.2.1 AgCdO 电触头材料

氧化物弥散强化银基电触头材料的典型代表 AgCdO 因兼具 Ag 的高导热、导电性能和低接触电阻以及 CdO 颗粒抗熔焊、抗粘接能力，使其在各类低压电器中得到广泛的应用。

AgCdO 电触头材料可采用压制—烧结—复压法、压制—烧结—挤压法、内氧化法、预氧化—压制—烧结—挤压法等工艺方法制备。不同方法制备的 AgCdO 电触头材料其性能存在明显的差异，如表 4.1-15 所示。

由于镉(Cd)及其化合物在 AgCdO 电触头材料的生产、使用、回收的全过程中都会产生“镉毒”，危害人体健康，污染和破坏环境，因此，AgCdO 电触头材料的使用受到越来越多的限制。

表 4.1-15　　银基电触头材料的成分与物理性能

产品名称	代表符号	成分	含量(质量分数)(%)	添加物总量(质量分数)(%)	杂质总量(质量分数)(%)	密度(g/cm^3)	电导率(%IACS)	电阻率($\mu\Omega \cdot cm$)	布氏硬度(HB)
银氧化镉(8)(I.O)	AgCdO(8)(I.O)	CdO Ag	8.0 余量	—	0.3	10.05～10.35	—	2.00	64～95
银氧化镉(8)—T(I.O)	AgCdO(8)-T(I.O)	CdO Ag	8.0 余量	1.5	0.3	10.05～10.35	—	3.00	67～119
银氧化镉(10)(I.O)	AgCdO(10)(I.O)	CdO Ag	10.0 余量	—	0.3	10.00～10.30	—	2.10	65～117
银氧化镉(10)—T(I.O)	AgCdO(10)-T(I.O)	CdO Ag	10.0 余量	1.5	0.3	10.00～10.30	—	3.20	69～122
银氧化镉(12)(I.O)	AgCdO(12)(I.O)	CdO Ag	12.0 余量	—	0.3	9.90～10.20	—	2.30	67～119
银氧化镉(12)—T(I.O)	AgCdO(12)-T(I.O)	CdO Ag	12.0 余量	1.5	0.3	9.90～10.20	—	3.40	69～122
银氧化镉(13)(I.O)	AgCdO(13)(I.O)	CdO Ag	13.0 余量	—	0.3	9.80～10.50	—	2.50	70～123
银氧化镉(13)—T(I.O)	AgCdO(13)-T(I.O)	CdO Ag	13.0 余量	1.5	0.3	9.80～10.50	—	3.50	74～126
银氧化镉(15)(I.O)	AgCdO(15)(I.O)	CdO Ag	15.0 余量	—	0.3	9.75～10.10	—	2.70	70～123
银氧化镉(15)—T(I.O)	AgCdO(15)-T(I.O)	CdO Ag	15.0 余量	1.5	0.3	9.75～10.10	—	3.50	74～126
银氧化锌(8)(I.O)	AgZnO(8)(I.O)	ZnO Ag	8.0 余量	—	0.3	9.70～10.05	—	3.20	65～117
银氧化锌(8)—T(I.O)	AgZnO(8)-T(I.O)	ZnO Ag	8.0 余量	1.0	0.3	9.70～10.05	—	3.40	69～125
银氧化锌(10)(I.O)	AgZnO(10)(I.O)	ZnO Ag	10.0 余量	—	0.3	9.55～9.85	—	3.40	71～124
银氧化锌(10)—T(I.O)	AgZnO(10)-T(I.O)	ZnO Ag	10.0 余量	1.0	0.3	9.55～9.85	—	3.50	74～126
银氧化铜(10)(I.O)	AgCuO(10)(I.O)	CuO Ag	10.0 余量	—	0.3	9.60～9.90	—	2.50	65～117
银氧化铜(10)—T(I.O)	AgCuO(10)-T(I.O)	CuO Ag	10.0 余量	1.0	0.3	9.60～9.90	—	3.50	69～122
银氧化锡(7)氧化铟(3)(I.O)	$AgSnO_2(7)In_2O_3(3)$(I.O)	SnO_2 In_2O_3 Ag	7.0 3.0 余量	—	0.3	9.80～10.15	—	3.30	740～1265
银氧化锡(7.5)氧化铟(3)—T(I.O)	$AgSnO_2(7.5)In_2O_3$-(3)-T(I.O)	SnO_2 In_2O_3 Ag	6.0 3.0 余量	1.0	0.3	9.80～10.15	—	3.20	78～128
银氧化锡(6)氧化铟(4)(I.O)	$AgSnO_2(6)In_2O_3$(4)-T(I.O)	SnO_2 In_2O_3 Ag	6.0 4.0 余量	—	0.3	9.80～10.15	—	3.30	72～125

续表

产品名称	代表符号	成分	含量(质量分数)(%)	添加物总量(质量分数)(%)	杂质总量(质量分数)(%)	密度(g/cm^3)	电导率(%IACS)	电阻率($\mu\Omega \cdot cm$)	布氏硬度(HB)
银氧化锡(8)氧化铟(4)—T(L.O)	$AgSnO_2(8)In_2O_3$(4)-T(L.O)	SnO_2 In_2O_3 Ag	8.0 4.0 余量	1.0	0.3	9.75～10.10	—	3.40	76～127
银氧化锡(9)氧化铟(4)—T(L.O)	$AgSnO_2(9)In_2O_3$(4)-T(L.O)	SnO_2 In_2O_3 Ag	9.0 4.0 余量	—	0.3	9.75～10.10	—	3.50	78～128
银氧化锡(10)氧化铟(4)—T(L.O)	$AgSnO_2(10)In_2O_3$(4)-T(L.O)	SnO_2 In_2O_3 Ag	10.0 4.0 余量	1.0	0.3	9.70～10.05	—	3.50	82～132
银氧化镉(8)(P.M)	AgCdO(8)(P.M)	CdO Ag	8.0±1.0 余量	—	0.5	9.90	78	2.20	63
银氧化镉(8)—T(P.M)	AgCdO(8)-T(P.M)	CdO Ag	8.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.90	62	2.80	65
银氧化镉(10)(P.M)	AgCdO(10)(P.M)	CdO Ag	10.0±1.0 余量	—	0.5	9.80	69	2.50	65
银氧化镉(10)—T(P.M)	AgCdO(10)-T(P.M)	CdO Ag	10.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.80	69	2.50	65
银氧化镉(12)(P.M)	AgCdO(12)(P.M)	CdO Ag	12.0±1.0 余量	—	0.5	9.70	64	2.70	67
银氧化镉(12)—T(P.M)	AgCdO(12)-T(P.M)	CdO Ag	12.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.70	54	3.20	69
银氧化镉(15)(P.M)	AgCdO(15)(P.M)	CdO Ag	15.0±1.0 余量	—	0.5	9.60	59	2.90	690
银氧化镉(15)—T(P.M)	AgCdO(15)-T(P.M)	CdO Ag	15.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.60	51	3.40	71
银氧化锌(8)(P.M)	AgZnO(8)(P.M)	ZnO Ag	8.0±1.0 余量	—	0.5	9.50	66	2.60	65
银氧化锌(8)—T(P.M)	AgZnO(8)-T(P.M)	ZnO Ag	8.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.50	56	3.10	67
银氧化锌(10)(P.M)	AgZnO(10)(P.M)	ZnO Ag	10.0±1.0 余量	—	0.5	9.30	62	2.80	67
银氧化锌(10)—T(P.M)	AgZnO(10)-T(P.M)	ZnO Ag	10.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.30	52	3.30	69
银氧化锌(12)(P.M)	AgZnO(12)(P.M)	ZnO Ag	12.0±1.0 余量	—	0.5	9.20	57	3.00	69
银氧化锌(12)—T(P.M)	AgZnO(12)-T(P.M)	ZnO Ag	12.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.20	49	3.50	71
银氧化铜(8)(P.M)	AgCuO(8)(P.M)	CuO Ag	8.0±1.0 余量	—	0.5	9.50	75	2.30	65
银氧化铜(8)—T(P.M)	AgCuO(8)-T(P.M)	CuO Ag	8.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.50	59	2.90	67
银氧化铜(10)(P.M)	AgCuO(10)(P.M)	CuO Ag	10.0±1.0 余量	—	0.5	9.40	69	2.50	67
银氧化铜(10)—T(P.M)	AgCuO(10)-T(P.M)	CuO Ag	10.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.40	56	3.10	69

续表

产品名称	代表符号	成分	含量(质量分数)(%)	添加物总量(质量分数)(%)	杂质总量(质量分数)(%)	密度(g/cm^3)	电导率(%IACS)	电阻率($\mu\Omega \cdot cm$)	布氏硬度(HB)
银氧化锡(8)(P. M)	$AgSnO_2(8)$ (P. M)	SnO_2 Ag	8.0±1.0 余量	—	0.5	9.70	66	2.60	66
银氧化锡(8)—T(P. M)	$AgSnO_2(8)$-T (P. M)	SnO_2 Ag	8.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.70	57	3.00	68
银氧化锡(10)(P. M)	Ag $SnO_2(10)$ (P. M)	SnO_2 Ag	10.0±1.0 余量	—	0.5	9.60	62	2.80	68
银氧化锡(10)—T(P. M)	Ag $SnO_2(10)$-T (P. M)	SnO_2 Ag	10.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.60	54	3.20	70
银氧化锡(12)(P. M)	Ag $SnO_2(10)$ (P. M)	SnO_2 Ag	12.0±1.0 余量	—	0.5	9.50	57	3.00	70
银氧化锡(12)—T(P. M)	Ag $SnO_2(10)$-T (P. M)	SnO_2 Ag	12.0±1.0 余量	2.0	0.5	9.50	51	3.40	72
银镍(10)	AgNi(10)	Ni Ag	10.0±1.0 余量	—	0.3	$10.10^{+0.2}_{-0.1}$	80	2.10	73
银镍(15)	AgNi(10)	Ni Ag	15.0±1.0 余量	—	0.3	$10.00^{+0.2}_{-0.1}$	76	2.20	—
银镍(20)	AgNi(10)	Ni Ag	20.0±1.0 余量	—	0.3	$9.90^{+0.2}_{-0.1}$	73～52	2.3～3.2	63
银镍(30)	AgNi(10)	Ni Ag	30.0±1.0 余量	—	0.3	$9.80^{+0.2}_{-0.1}$	62	2.70	78
银镍(40)	AgNi(10)	Ni Ag	40.0±1.0 余量	—	—	$9.80^{+0.2}_{0.1}$	70～44	2.4～3.8	78
银铁(7)	AgFe(7)	Fe Ag	7.0±1.0 余量	—	0.3	$10.10^{+0.2}_{-0.1}$	84	2.00	75
银镍(29)石墨(3)	AgNi(29)C(3)	Ni C Ag	29.0±1.0 3.0 余量	—	0.3	8.90	37	4.50	63
银石墨(3)Q	AgC(3)Q	C Ag	3.0±0.5 余量	—	0.5	9.10	78	2.20	34
银石墨(5)Q	AgC(5)Q	C Ag	5.0±0.8 余量	—	0.5	8.60	69	2.50	34
银石墨(10)Q	AgC(10)Q	C Ag	10.0±1.0 余量	—	0.5	7.40	57	3.00	29
银石墨(3)P	AgC(3)P	C Ag	3.0±0.5 余量	—	0.5	9.10	72	2.40	R：24 Y：39
银石墨(5)Q	AgC(5)	C Ag	5.0±0.8 余量	—	0.5	8.60	54	3.20	R：24 Y：39
银钨(30)	AgW(30)	AgW	70.0±1.5 余量	—	0.5	11.75	75	2.30	73
银钨(40)	AgW(40)	AgW	60.0±1.5 余量	—	0.5	12.40	66	2.60	83
银钨(50)	AgW(50)	AgW	50.0±2.0 余量	—	0.5	13.15	57	3.00	103
银钨(55)	AgW(55)	AgW	45.0±2.0 余量	—	0.5	13.55	54	3.20	112

续表

产品名称	代表符号	成分	含量(质量分数)(%)	添加物总量(质量分数)(%)	杂质总量(质量分数)(%)	密度(g/cm^3)	电导率(%IACS)	电阻率($\mu\Omega \cdot cm$)	布氏硬度(HB)
银钨(60)	AgW(60)	AgW	40.0±2.0 余量	—	0.5	14.00	51	3.40	122
银钨(65)	AgW(65)	AgW	35.0±2.0 余量	—	0.5	14.50	48	3.60	132
银钨(70)	AgW(70)	AgW	30.0±2.0 余量	—	0.5	14.90	45	3.80	147
银钨(75)	AgW(75)	AgW	25.0±2.0 余量	—	0.5	15.40	41	4.20	168
银钨(80)	AgW(80)	AgW	20.0±2.0 余量	—	0.5	16.10	37	4.60	175
银钨(50)	CuW(50)	CuW	50.0±2.0 余量	—	0.5	10.85	54	3.20	118
银钨(55)	CuW(55)	CuW	45.0±2.0 余量	—	0.5	12.3	49	3.50	122
银钨(60)	CuW(60)	CuW	40.0±2.0 余量	—	0.5	12.75	47	3.50	137
银钨(65)	CuW(65)	CuW	35.0±2.0 余量	—	0.5	13.30	44	3.90	152
银钨(70)	CuW(70)	CuW	30.0±2.0 余量	—	0.5	13.80	42	4.10	171
银钨(75)	CuW(75)	CuW	25.0±2.0 余量	—	0.5	14.50	38	4.50	191
银钨(80)	CuW(80)	CuW	20.0±2.0 余量	—	0.5	15.15	34	5.00	210
银钨(85)	CuW(85)	CuW	15.0±2.0 余量	—	0.5	15.90	30	5.70	235
银钨(90)	CuW(90)	CuW	10.0±2.0 余量	—	0.5	16.75	27	6.50	255
银碳化钨(12) 石墨(3)	AgWC(12)C(3)	AgWC 总 C	85.0±1.0 12.0±1.5 3.7±0.5	—	0.3	9.40	54	3.20	60
银碳化钨(12) 镍石墨	AgWC(12)NiC	AgWC 总 C	85.0±1.0 12.0±1.5 2.7±0.5	—	0.3	10.30	75	2.30	78
银镍(10)	AgNi(10)	Ni Ag	10.0±1.0 余量	—	0.3	$10.10^{+0.2}_{-0.1}$	82	2.10	73
银镍(10)	AgNi(30)	Ni Ag	3.0±1.0 余量	—	0.3	$9.80^{+0.2}_{-0.1}$	64	2.70	78
银铁(7)	AgFe(7)	Fe Ag	70.0±1.0 余量	—	0.3	$10.10^{+0.2}_{-0.1}$	87	2.00	68
铜石墨(3)	CuC(3)	C Cu	3.0±0.5 余量	—	0.5	8.10	58	3.00	59
铜石墨(5)	CuC(5)	C Cu	5.0±0.8 余量	—	0.5	7.00	51	3.40	59
铜碳化钨(15)	CuWC(15)	WC Cu	12.0±1.0 余量	—		9.15	62	2.80	78

注 1. 表中 T 表示含有添加物，为改善性能而添加的元素不属杂质；(P.M)表示粉末冶金工艺；(I.O)表示内氧化工艺，一般当材料可用任一种工艺生产时加注以示区别；Q 代表烧结挤压法生产的纤维型石墨触头；P 代表烧结复压法生产的普通型银石墨触头；R 代表经复压加工后再进行退火热处理的 P 型软态银石墨触头；Y 代表经复压加工后的 P 型硬态银石墨触头。

2. 电导率%IACS 是以国际标准软铜（即退火铜）的电阻率为 1.724 1$\mu\Omega \cdot cm$ 时的 100%换算来的。

3.1.2.2　$AgSnO_2$ 电触头材料。

$AgSnO_2$ 电触头材料是由第二相 SnO_2 弥散分布于 Ag 基体中的金属复合材料。自 20 世纪 70 年代中期日本首先用合金内氧化法成功制备出 $AgSnO_2$ 电触头材料以来，关于 $AgSnO_2$ 电触头材料的研究方兴未艾，如今在材料的成分、工艺、性能等方面都取得了积极的进展，其应用领域逐渐扩大。

(1) $AgSnO_2$ 电触头材料制备技术。制备 $AgSnO_2$ 电触头材料的工艺方法多种多样，各具特色，为此，简要介绍几种 $AgSnO_2$ 电触头材料的制备技术。

1) 机械合金化(Mechanical Alloying，MA)工艺：该工艺采用高能球磨技术，是一种固态下合成平衡相、非平衡相或混合相的工艺，可以达到元素间原子级水平的合金化。MA 工艺制备 $AgSnO_2$ 触头材料的机理为：第一阶段以氧化锡颗粒破碎为主，作用时间较短；第二阶段以颗粒分布均匀为主；通过调整 MA 工艺，可获得显微组织结构均匀、具有适当的力学性能和良好的加工性能的金属基复合材料。采用 MA 法制备的 $AgSnO_2$ 触头材料与采用常规粉末冶金工艺制备的 AgCdO、$AgSnO_2$ 触头材料相比，具有的优良性能为：硬度高，密度几乎等于其理论密度，电导率高，氧化物在银基体中弥散分布。

反应球磨技术是在球磨过程中利用金属或合金粉末与其他单质或化合物之间的化学反应来制备所需材料的技术，是 MA 技术新的发展方向。通过将 Ag_3Sn 和 Ag_2O 高能球磨，借助于如下反应：

$$Ag_3Sn+2Ag_2O \longrightarrow 7Ag+SnO_2$$

可制备纳米尺度的 SnO_2 高度弥散分布在银基上的 Ag-SnO_2 触头材料。Lorrain N. 等研究了反应球磨技术的动力学和反应机理。

2) $AgSnO_2$ 复合粉化学沉淀法：该工艺的研究主要集中在将溶液中的银沉积在悬浮的 SnO_2 颗粒上。$AgSnO_2$ 复合粉化学共沉淀法的具体制备工艺变化多样，各具特色，因氧化物种类及颗粒大小、沉积体系及还原过程不同而存在较大差异。① 欧洲专利的方法是在含悬浮 SnO_2 颗粒的 AgNO 溶液中，使 AgNO 以氧化银的形式沉积在 SnO_2 颗粒上，得到氧化银、氧化锡混合粉，将所得混合粉加热使氧化银还原为银，从而得到 $AgSnO_2$ 复合粉。但该法在添加剂的选择上受到较大的限制，因为在氧化银的沉积条件下，溶液中的添加剂很难沉积出来。② 美国专利的方法可任意选择添加剂及添加量，其沉积过程为：含悬浮 SnO_2 的 AgNO 溶液喷射到含还原剂(水合肼)的容器中，或者将水合肼喷射到含悬浮 SnO_2 的 AgNO 溶液中，还原得到复合粉，经过粉碎、压磨后得到分布均匀、流动性好的粉体。但该法所采用的还原剂水合肼对人体健康和环境有害，并且在沉积过程中产生大量的微细银颗粒不能与氧化物颗粒相结合，由此得到的均匀一致的复合粉，在进一步处理过程中，还将产生大量的粗大银簇。③ 国内研究的化学镀包覆法是在 TiO 掺杂纳米 SnO_2 粉末的水溶液中滴加水合肼后，加入到含适量 AgNO 的水溶液中充分搅拌，同时加入少量氨水，得到银包覆 SnO_2 颗粒沉淀。

超声化学包覆法的特点是：将绝缘 SnO_2 通过掺杂锑元素改性为导电 SnO_2，降低了材料的电阻，特别是高温电阻；可在包覆反应中引入超声能量。在化学反应中引入超声能量可使 SnO_2 更加均匀地弥散分布在反应悬浮液中，使 SnO_2 颗粒能最大限度地弥散分布在 Ag 基体中。化学共沉淀法的缺点在于 SnO_2 颗粒尺寸均匀性差，在粉体制备过程中存在着酸、碱、盐的污染问题。图 4.1-18 是超声化学包覆法工艺流程图。

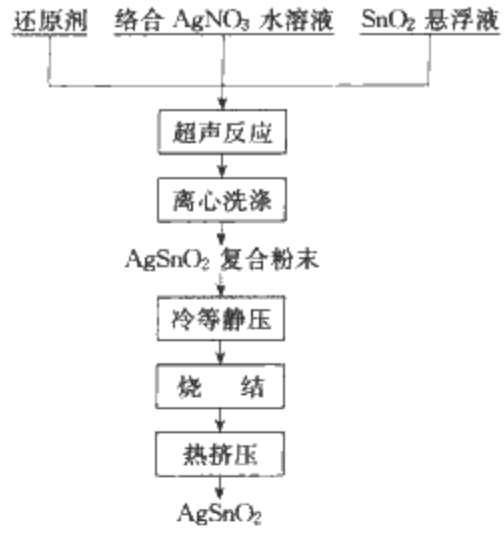


图 4.1-18　超声化学包覆法工艺流程

3) 反应雾化法制造 SnO_2 粉末工艺：其过程为将含有所需粉末元素的水溶液(如锡的氯化物、锡的醋酸盐等)进行热分解，即将此种溶液喷入一个热反应容器中蒸发水分，反应后粉末即从液滴中产出。溶液中有少量几种添加物，如锡的氯化物、锡的醋酸盐等不同的盐类，这些起初含有盐类或氢氧化物的微粒与容器中的水蒸汽反应，生成氧化物、混合氧化物或氧化物的混合体。通过改变反应参数，如改变温度、液滴尺寸等，影响液滴的化学性质，最终获得所需的化合物粉末。观测结果表明，反应喷雾法生产出来的 SnO_2 粉末颗粒内不同成分的分布极为均匀。将掺杂 SnO_2 的粉末经与 Ag 粉混合、冷压、烧结制造成新型的 $AgSnO_2$ 触点材料，这种新型材料不仅在 AC3 寿命方面有所改进，而且在容性负载应用条件下其性能也令人满意。德国 Inovan GmbH&. C0 公司研究的"喷雾法"是将含 Ag、Sn 等的硝酸盐溶液流入一垂直的高温(900℃)反应炉中，溶液经雾化、蒸发、分解后，在炉底收集得 AgMeO 粉末，其中 MeO 是包括 SnO_2 和 In_2O_3、CuO 等的氧化物。采用这种方法可制造出具有不同组成和微结构的触头材料。

反应喷雾法中雾化反应离不开高压设备，而该类设备投资较大，成本较高。

4) 溶胶-凝胶法制备 SnO_2- TiO_2 粉末的工艺：其流程为将一定配比的 SnCl4 和 TiCl4 的醇水溶液加入聚乙二醇(PEG)分散剂，边搅拌边滴入氨水，至 pH＝7，静置沉化 1～2天，洗涤、烘干后获得凝胶，再经研磨得到纳米 SnO_2-TiO_2粉末。将制得的纳米 SnO_2- TiO_2粉末用化学镀的方法进行包覆后与纯 Ag 粉按 90∶10 混合放入模具中压制成型后烧结，制成 $AgSnO_2TiO_2$触头材料。

5) 高压内氧化工艺：在氧压大于 10MPa 下对 AgSn 二元合金进行高压氧化，所制材料中的 SnO_2 颗粒细小、均匀，弥散分布于 Ag 基体中，在该材料中心区域不会出现氧化物贫乏层。其突出特点是即使 Sn 含量为 6%～10%（原子百分比），也可以实现二元合金的内氧化(常规氧化则难做到)。采用高氧分压可以有效地抑制氧扩散速度的降低，使 Ag 基体内氧化物颗粒弥散分布，且在高氧分压下，添加的元素难以向表面扩散，甚至添加高浓度元素的材料表面也不会出现氧化物致密层，因此在材料中心部位不会呈现氧化物稀薄层。但其缺点是：①氧化物呈波状析出，降低了触头的耐损蚀性；②其电导率比低压内氧化材料低，原因在于在高压内氧化时，氧在材料中过量扩散，呈过饱和固溶体，导致触头材料电导率降低；③接触电阻的稳定性也有问题；④该

材料在较高温度下具有很高的硬度，给触头成形加工造成困难。

为了避免高压内氧化法的缺点，常在高压氧化后将材料在比高压内氧化温度高、比高压氧化的氧压低、或实际上不含氧的气氛中进行热处理，此举可有效地增加材料的电导率，从而使该材料的电性能大大优于常规的 Ag 基材料。

6）粉末预氧化工艺(P/O 法)：一种将粉末冶金法和合金内氧化法结合在一起的新工艺，该工艺同时兼有粉末冶金法和合金内氧化法工艺的特点，而且克服了二者的不足。其典型工艺流程是：AgSn 合金熔化后，将其液流破碎成细粉，合金粉末经内氧化后用一般粉末冶金方法进行压制、烧结、挤压。该工艺利用快速凝固的特点，使金属氧化物质点细小(<1 μm)，均匀地分布在银基体中，微观结构不出现偏析，具有抗腐蚀、抗熔焊、电寿命长、塑性好、材料利用率高等优点；由于 Sn 和 In 等氧化物弥散分布于 Ag 中，每一个内氧化颗粒都与富 Ag 相连，增大了流动性，使电流流动更容易，提高了材料的电导率；由于该工艺从快速凝固和雾化合金粉末开始，然后进行热等静压，相对减少了加工步骤，且微细颗粒内氧化时间大为减少。因此，P/O 工艺在经济效益方面也是很有吸引力的。但用该法所得材料的硬度、密度都不如 I/O 工艺的高。图 4.1-19 是粉末预氧化工艺流程图。

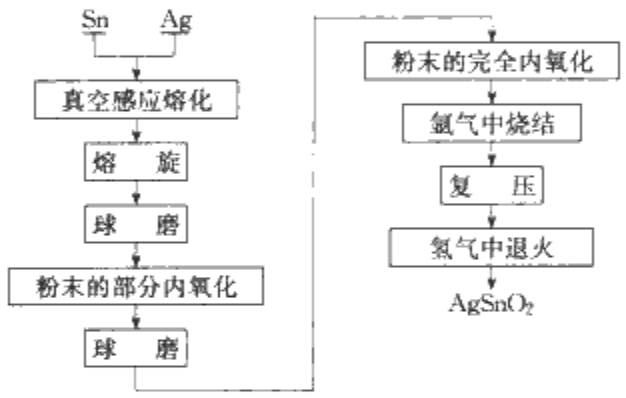


图 4.1-19 粉末预氧化工艺流程

7）反应合成技术制备 $AgSnO_2$ 电触点材料工艺：其过程为配料—压制—反应合成(烧结)—挤压—拉拔成丝材。在原料锭坯烧结过程中引入原位化学反应—Ag 基体反应，可合成增强相 SnO_2。其反应式为：

$$Ag_3Sn+2Ag_2O \longrightarrow 7Ag+SnO_2$$

并可通过控制原料状态、反应气氛、反应温度、反应速度等工艺参数来控制 SnO_2 颗粒的含量、分布和大小。该技术的特点是将粉末冶金技术和内氧化技术有机地结合在一起，其材料制备过程与粉末冶金法相当、材料合成技术与内氧化法相近。采用反应合成技术制备的 Ag SnO_2 电触点材料，其 SnO_2 颗粒是在 Ag 基体内部通过反应原位获得的，新鲜、洁净的 SnO_2 颗粒表面与 Ag 基体具备了通过化学键结合的可能性，解决了 SnO_2 颗粒与 Ag 基体的界面相容性问题。并且 SnO_2 颗粒的弥散随加工过程完成，易于材料的后续加工。因此，与传统的粉末冶金法制备的 $AgSnO_2$ 电触点材料相比，该法所得材料的加工性能大为改善，基本解决了粉末冶金制备的 $AgSnO_2$ 电触点材料难于加工的问题。与内氧化法制备的 $AgSnO_2$ 电触点材料相比，该法所得材料的电阻率减小，较好地解决了内氧化法制备的 $AgSnO_2$ 电触点材料电阻率高、适用范围窄的问题。该法原料准备简单、工艺流程短、生产过程无污染、产品质量稳定。

(2) 添加物对 $AgSnO_2$ 触头材料物理特性和电弧侵蚀特性的影响。由于 SnO_2 和 CdO 具有不同的热稳定性及液态银对 SnO_2 和 CdO 具有不同的润湿性，在电弧的作用下，$AgSnO_2$ 材料在侵蚀过程中的冶金学特性是与 AgCdO 材料的冶金学特性有很大区别的，这也导致 $AgSnO_2$ 材料在运行过程中尤其是设备操作次数很高时，其温升较 AgCdO 材料的温升高。此时通过添加特定的添加剂，则可有效地降低开关操作过程中 $AgSnO_2$ 触头材料的温升，常用的添加剂有 WO_3、Bi_2O_3、In_2O_3、CuO、TiO_2 及稀土元素 RE(La、Ce、Y)等。添加剂的助润湿性、热稳定性及对熔融液态银粘滞性的影响等将对 $AgSnO_2$ 触头材料物理特性和电弧侵蚀特性产生影响。

1）添加元素对 Ag—Sn 合金内氧化速度的影响。Cu、Zn、Sb、Bi、In 等元素对 Ag—Sn 合金内氧化速度的影响示于图 4.1-20。图中表明添加金属元素的 Ag—Sn 合金内氧化层厚度的增加与时间的关系呈抛物线型，Bi、Sb 能明显加速 Ag—Sn 合金内氧化速度。

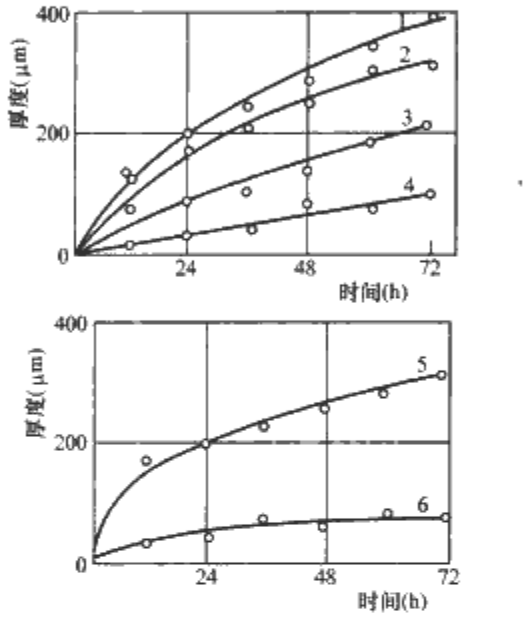


图 4.1-20 添加元素对 Ag—Sn 合金内氧化层厚度与时间的影响

注：图中 1 为 Ag—6.5Sn—3Bi；2 为 Ag—6.5Sn—3Sb；3 为 Ag—6.5Sn—3Cu；4 为 Ag—6.5Sn—3Zn；5 为 Ag—6.5Sn—1.1Bi—0.6Cu；6 为 Ag—6.5Sn—1.5In；工艺条件为 0.4～0.6MPa O_2；T=500℃。

2）几种常用添加氧化物对 $AgSnO_2$ 触头材料性能的影响。图 4.1-21 示出了 $AgSnO_2WO_3$、$AgSnO_2In_2O_3$ 分别对称配对分断交流电流 20A 时，触头材料损耗量随接触次数的变化关系。结果表明：在小电流情况下，$AgSnO_2WO_3$ 材料的抗电弧侵蚀能力优于 $AgSnO_2In_2O_3$ 的抗电弧侵蚀能力。

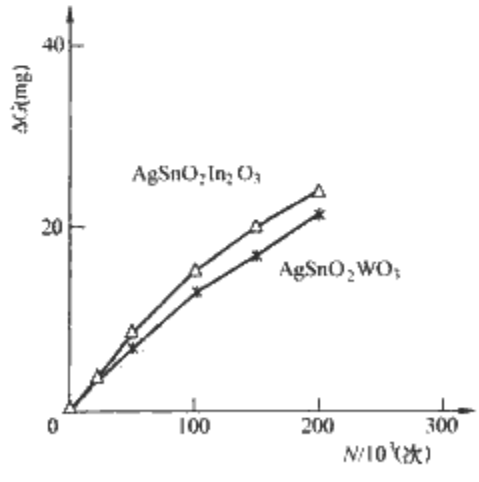


图 4.1-21 $AgSnO_2WO_3$、$AgSnO_2In_2O_3$ 分断交流电流 20A 时的抗电弧侵蚀能力

图 4.1-22 示出了 $AgSnO_2WO_3$、$AgSnO_2In_2O_3$、$AgSnO_2Bi_2O_3$ 电触头材料分断交流电流 50A 时，触头材料损耗量随接触次数的变化关系。结果表明：$AgSnO_2WO_3$ 材料的抗电弧侵蚀能力明显优于 $AgSnO_2Bi_2O_3$ 材料的抗电弧侵蚀能力。

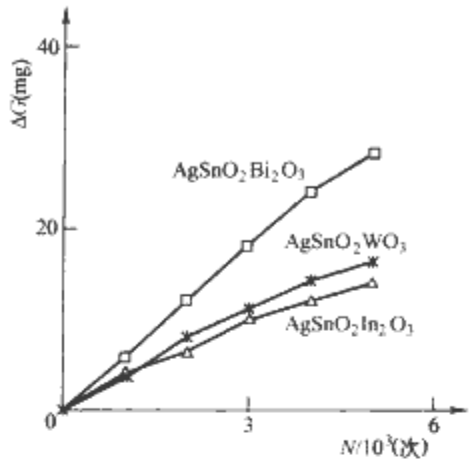


图 4.1-22　$AgSnO_2WO_3$、$AgSnO_2In_2O_3$、$AgSnO_2Bi_2O_3$ 分断交流电流 50A 时的抗电弧侵蚀能力

图 4.1-23 和图 4.1-24 分别示出了 $AgSnO_2WO_3$、$AgSnO_2In_2O_3$ 和 $AgSnO_2Bi_2O_3$ 触头材料分断直流电流 16A 和直流电流 100A 时，其阴、阳极触头材料总损耗随接触次数的变化关系。结果表明，$AgSnO_2Bi_2O_3$ 触头材料的损耗量最大，$AgSnO_2WO_3$ 和 $AgSnO_2In_2O_3$ 触头材料的损耗大体接近。

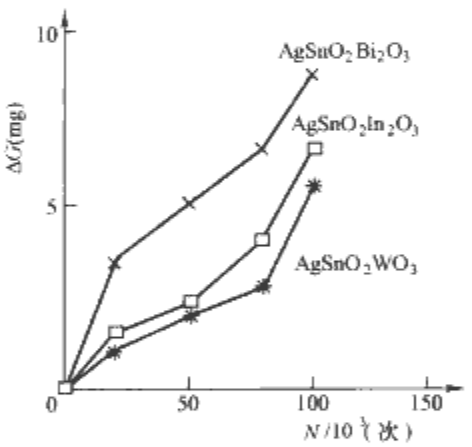


图 4.1-23　$AgSnO_2WO_3$、$AgSnO_2In_2O_3$ 和 $AgSnO_2Bi_2O_3$ 分断直流电流 16A 时的抗电弧侵蚀能力

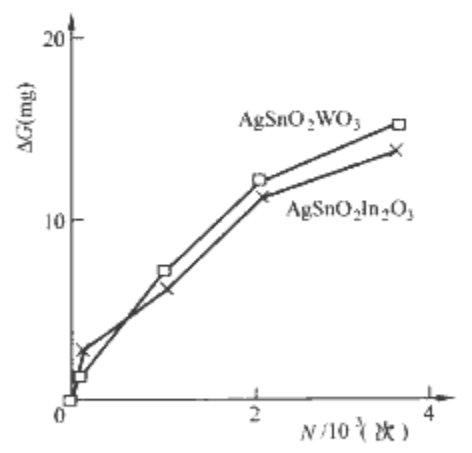


图 4.1-24　$AgSnO_2WO_3$ 和 $AgSnO_2In_2O_3$ 分断直流电流 100A 时的抗电弧侵蚀能力

Ag 在 SnO_2 片上的润湿角随 CuO 含量的变化如图 4.1-25 所示。Ag 与纯 SnO_2 的润湿性很差，润湿角为 90°，在 SnO_2 中添加 CuO 可以明显地降低它和 Ag 的润湿角，3% CuO 的加入就能使润湿角由纯 SnO_2 时的 90°迅速地减小到 53°。而后随 CuO 含量的增加，其润湿角继续减小。含 7% CuO 时，其润湿角为 29°，此时 CuO 只占 $AgSnO_2$ 触头材料的 0.84%。对 $AgSnO_2$(12)电触头材料，CuO 含量小时，可以在保证 $AgSnO_2$ 其他性能稳定性的前提下，提高 Ag 对 SnO_2 的润湿性。图 4.1-26 是 Ag 在 SnO_2 陶瓷基片上润湿性的宏观照片，图 4.1-26(a)为不含 CuO；4.1-26(b)为含 3%CuO；4.1-26(c)为含 5%CuO；4.1-26(d)为含 7%CuO。

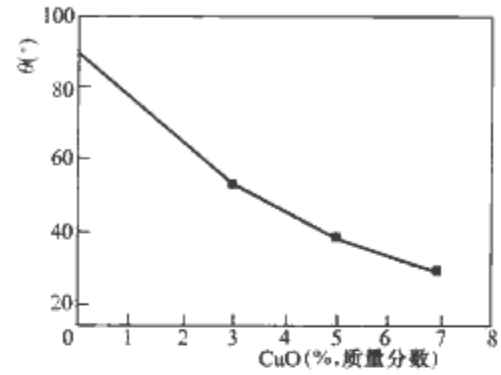


图 4.1-25　Ag 在 SnO_2 片上的润湿角随 CuO 含量的变化

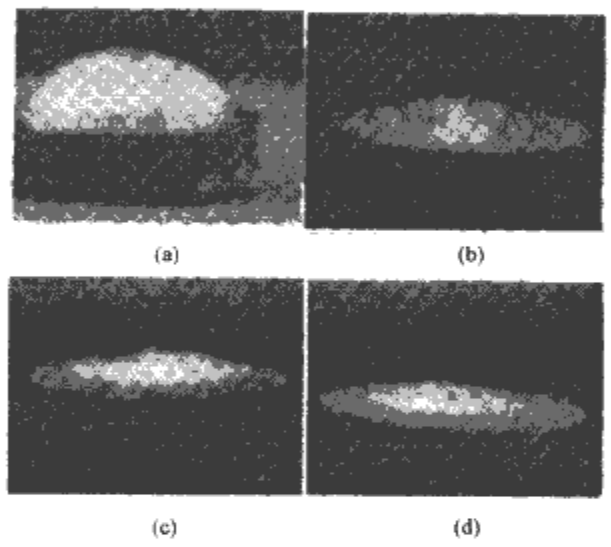


图 4.1-26　Ag 在 SnO_2 陶瓷基片上润湿性的宏观照片

图 4.1-27 为 $AgSnO_2TiO_2$ 触头材料的硬度随 TiO_2 含量变化的曲线。由图可以看出，纳米 Ag SnO_2 触头材料的硬度随掺入的 TiO_2 量的增加而下降。分析认为，这是由于随 TiO_2 含量的逐渐增加，TiO_2 析出 SnO_2 的晶格所致。图 4.1-28 为 $AgSnO_2TiO_2$ 触头材料电导率随 TiO_2 含量变化的曲线。

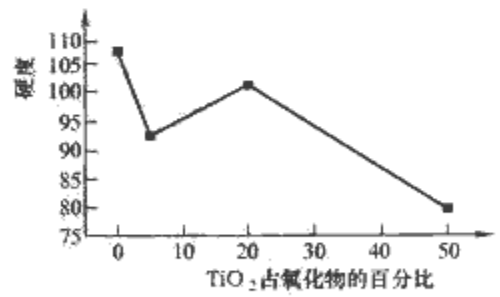


图 4.1-27　$AgSnO_2TiO_2$ 触头材料的硬度随 TiO_2 含量变化的曲线

3) 稀土元素的影响。稀土元素具有较好的细化合金晶粒的作用，能较好地分布于银基体中，明显促进合金的内氧化。稀土氧化物具有较高的分解温度(>2000℃)，稳定性较高，且悬浮在银熔池中增大其黏度，减少银的侵蚀和迁移。银合金加入稀土后其硬化效果明显，这是由于稀土降低了银的层错能，在冷变形中使扩展位错的交滑移动更困难，位错

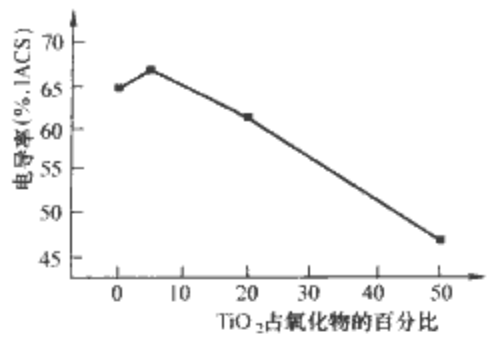


图 4.1-28 $AgSnO_2TiO_2$ 触头材料电导率随 TiO_2 含量变化的曲线

密度提高，且稀土元素偏聚在晶界附近，形成的稳定分散的第二相也强化了银合金。在加热过程中，这些第二相对晶界运动产生了较强的阻力，使再结晶晶粒的形核和长大受到抑制，从而提高了再结晶温度，使触头材料的抗熔焊性、耐电弧烧损性增加。

3.1.2.3 其他 Ag-氧化物电触头材料

(1) AgZnO 电触头材料。由于 ZnO 是一种热稳定性很高的氧化物，熔点达 1975℃，通过一定的工艺技术，可使 ZnO 均匀地分布于银基体中，形成一种弥散强化的假合金 AgZnO，它以抗大电流(3000～5000A)冲击、分断性能好、燃弧时间短、耐电腐蚀、无毒害性等一系列优点逐渐在低压电器中得到应用。在浪涌电流载荷下，AgZnO 材料的电接触特性远低于 $AgSnO_2$ 电触头材料，这是 AgZnO 电触头材料目前研究的重要方向之一。

AgZnO 材料的制备工艺主要有内氧化法和粉末冶金法。合金内氧化法 AgZnO 是一种便于大批量生产的方法，其优点是材料致密性好，工艺简单，生产率高，通过微量添加物(Ag_2WO_4、Ag_2MO_4 等)可增加润湿性和结合能力，改善材料的加工性和电性能，特别适用于生产尺寸较小的触头。但是合金板进行内氧化时易形成“亮带”即“贫锌区”，会严重地降低材料的抗熔焊性和电寿命，因此通过选择合适的成分和内氧化条件，可以制备具有优越的耐熔焊性、耐烧损性和稳定的接触电阻的材料，该类材料目前在小容量漏电保护开关中得到了广泛应用。粉末冶金法 AgZnO 主要采用共沉淀制粉或雾化制粉，再通过等静压、烧结、挤压等工艺技术制得 ZnO 分布均匀、硬度高、耐电磨损、性能稳定的材料。该工艺制造的 AgZnO 通过挤压形成纤维状，当纤维与接触面垂直时，材料的耐烧损性提高，工作中还能抑制电弧引起的熔融相的流动及“喷射”，并增强了抗电弧能力，特别适用于制造尺寸规格较大的触头，目前在 DW17 型(ME)等断路器上获得良好的应用。

(2) AgREO 电触头材料。稀土氧化物是一种很好的弥散剂，并具有高熔点和高稳定性，表 4.1-16 是典型稀土氧化物的热重-差热分析基本性能指标。在无 Cd 触头材料的研究开发中，对 AgREO 的研究发现，AgREO 触头材料具有良好的抗电弧侵蚀性，接触电阻低且稳定，抗熔焊，其导电、导热性接近纯银，使用电流、电压的范围宽，是一类用途很广的触头材料。

研究分析认为，银基体中稀土氧化物的作用主要表现在于：

1) 细化晶粒。稀土极易同其他杂质形成高熔点化合物，在熔体中悬浮或弥散分布，在凝固过程中产生异质颗粒机械地阻止晶粒长大，使晶粒细化。

2) 提高再结晶温度，增强合金的热稳定性。稀土元素与银基体金属形成高熔点金属间化合物或氧化物偏聚在晶界上，使银金属基体的再结晶温度提高了约 250℃，在高温时，这种合金的二次再结晶受到较强的抑制，提高了其热稳定性。

3) 微合金化作用。稀土在银金属基体中起弥散强化作用。

4) 稀土降低了基体金属的层错能，增大了位错密度。

表 4.1-16 稀土氧化物的性能指标

名称	密度 (g/cm^3)	热 容 [cal/(g·℃)]	沸点 (℃)	生成热 (cal/mol)	分解温度 (℃)
La_2O_3	6.75	0.079 4	4200	543 000	2315
Ce_2O_3	7.35	—	—	233 000	1390
Y_2O_3	5.05	0.117	4300	440 000	2400

注 1cal=4.18J。

$AgLa_2O_3$ 是被研究较多的一种 AgREO 电触头材料，$AgLa_2O_3$ 中 La_2O_3 的含量基本为 8%～12%，其制备方法主要是机械合金法和粉末冶金法。为了提高 AgREO 电触头材料的综合性能，根据该材料成分呈多元化的特点，可在材料中添加其他微量元素(如 Bi，Zr，In，Fe，Pb 等)，以实现“共乘作用”。

除了 AgZnO、AgREO 电触头材料外，以银氧化镍(AgNiO)、银氧化铜(AgCuO)、银氧化铁($AgFe_2O_3$)、银三氧化钨($AgWO_3$)、银氧化铁氧化锆($AgFe_2O_3ZrO_2$)等材料替代 AgCdO 电触头材料，也是当前研究的方向。

3.1.2.4 梯度 AgMeO 电触头材料

功能梯度材料(Functionally Gradient Materials，FGM)是指材料的一种或数种参量(如组分、结构和物理性能等)在材料内部呈空间变化的高技术新材料。FGM 的研究是从应用需要出发，从材料设计到制备形成关联的有机结合，以适应现代应用对材料提出的越来越苛刻的要求。从材料物理的角度看，电接触材料既是结构材料(要考虑力学、热学性质)，又是功能材料(利用电磁学性质等)，既有物理过程(热、电输运)，又有化学过程(组分分解、化合等)，因此需要将力、热、电、磁等物理性质统一考虑和处理。在电接触学科研究中一个关键的问题是：对电接触过程和相关材料的研究往往是从接触的界面和表面出发，着眼于其中的均匀结构和性能，认为接触仅仅是一个界面或表面过程，而忽略了材料表面和内部的联系以及性能的非均匀分布的重要影响。利用功能梯度材料概念来设计和制备新型 AgMeO 电触头复合材料的基本考虑是：建立电接触性能参量空间分布的理论模型，根据实际的应用需求，对涉及的电阻、热导、摩擦磨损、弹性模数、熔点、抗熔焊性等关键参量进行优化组合，不追求各个参量均达到高指标，而是利用一些参量形成的梯度分布达到互补的作用，以寻求材料整体性能的提高。这种新颖的电触头材料的设计思想，突破了传统的电触头材料的设计和材料性能参数上的“均匀性”，从而为无毒、节银和高性能电触头材料的研究拓宽了发展方向，由此引入的非均匀条件下的电接触物理研究可能会形成一个新的学科生长点。

目前，梯度 AgMeO 电触头材料研究尚处于起步阶段，有待于功能梯度材料制备技术的完善和梯度 AgMeO 电触头材料的模型建立。一般认为梯度 AgMeO 电触头材料的模型建立应考虑：①一种金属氧化物的含量呈梯度变化；②保持数种金属氧化物的总含量不变，各氧化物分量呈梯度变化；

③保持组分不变，而制备金属氧化物的粒径呈梯度变化；④其他根据需要专门设计的电触头功能梯度材料。

制备功能梯度材料的方法有多种，目前梯度 AgMeO 电触头材料的研制主要采用粉末冶金法的填充法和流延法。填充法和流延法的区别是：样品成型时，填充法是将粉末逐一倒入模具中压片成型，而流延法是先将每一粉料配成浆料在流延机上流延成片，再逐一放入模具中压片成型。其主要工艺流程为：制料→成型→烧结→复压、复烧→加工处理。

3.2　低压电器用电触头材料的电气性能特点和用途

低压电器用电触头材料的电气性能特点和用途见表 4.1-17。

表 4.1-17　　电触头材料的电气性能特点和用途

触头品种	性能特点	用　途
银氧化镉	具有良好的耐电磨损、抗熔焊性和导电性、导热性，接触电阻小而稳定。由于材料的硬度高而提高了机械耐磨损性，银氧化镉电触头在通过短路电流时抗熔焊能力强，触头制备工艺对其性能影响很大。粉末冶金工艺制备的触头有较好的抗熔焊性，但耐损蚀性能差，合金内氧化法触头的耐电损蚀性好，但抗熔焊性略低，近年发展的粉末烧结挤压法工艺改善了氧化镉在银基体中的分布形态，使触头的综合性能得以提高，但银氧化镉最大的缺点是镉对人体有危害，污染环境	应用于各种电流等级的接触器、单极塑壳断路器、漏电断路器、直流快速断路器、凸轮开关、汽车接触器、汽车保护开关、光控开关、室内恒温器、微型开关和断流容量大的继电器以及航空工业用的各种开关
银氧化铜 银氧化锌 银氧化锡	氧化物含量(质量分数)一般在 5%～12%范围。与银氧化镉相比，这些材料不含有毒金属镉，其中的金属氧化物热稳定性高，具有良好的导电性和导热性，在通断过程中对电弧有很高的耐热、耐电弧侵蚀及抗熔焊性能，从而保证了电器运行的可靠性，提高了使用寿命。近年来银氧化锡发展得较快，甚至在一些电器开关的设计中不必做大的改变，就可以直接用银氧化锡取代银氧化镉，其使用范围为 10～1000A，在许多性能上接近甚至优于银氧化镉	继电器、接触器、低压断路器、限流开关、电机保护器、微型开关、仪器仪表、家用电器、汽车电器(灯开关、起动电机等负载)、漏电保护开关等
银镍	导电导热性好，接触电阻低而稳定，电损蚀小而均匀，直流条件下产生较少的平面状材料迁移。该材料通断时由于氧化物的生成而使接触电阻增高，对硫敏感，大电流下抗熔焊性能差。常与银石墨配对使用。通过采用粉末烧结、挤压工艺，可使触头性能改善。在银镍中添加少量石墨[如 AgNi(10)C(3)]，可得到性能更好的复合材料	低压中小电流等级接触器、断路器、精密仪表、继电器等
银石墨	导电性好，接触电阻低，抗熔焊性高，在短路电流下也不会熔焊，滑动性能好。但电损蚀大，灭弧能力较差，在电弧的较长时间作用下，烧损剧烈，使灭弧罩积炭、脆弱和较难焊接	作为弧触头最大的应用领域有低压断路器、线路保护开关、故障电流保护开关以及滑动电刷、铁道信号继电器等。对许多应用场合，质量分数为 3%的石墨含量即可符合使用要求，在苛刻通断条件下，其含量(质量分数)可达到 5%
银铁	具有良好的导电、导热、耐电损蚀及加工性能，寿命高于纯银触头。抗熔焊性能较差，易受大气侵蚀而形成锈斑	广泛应用于中、小电流等级的交流接触器上
银钨 银铝 银碳化钨	银钨和银铝烧结材料将银的高电导率、热导率与高熔点金属钨和铝的高硬度、抗熔焊、材料转移小、高耐烧损性结合为一体。银钨触头在工作电流下于空气中频繁通断会在触头表面上生成混合氧化物，从而形成可使接触电阻升高的表面膜。含铂触头比含钨触头具有更好的自净化作用，但铂的耐烧损性却不及钨 银碳化钨的接触电阻比银钨、银铝稳定，耐电弧作用好，因而烧损少，熔焊倾向小，可与银镍配对使用	低压断路器、高压断路器及保护开关等
铜钨 铜碳化钨	性能与银钨相似，在油中不氧化，热容量大，耐电弧侵蚀和抗熔焊性好，切削加工性好。但比银钨更易氧化，使接触电阻迅速增大。在空气中通断时只能用在没有持续电流通过，而只须经受开关电弧作用的场合或受机械应力作用极强的场合 铜碳化钨由良导电金属铜与特别坚硬而又抗熔焊的碳化钨构成，耐电弧作用好、烧损少	用作高压断路器及中、高压负荷开关和断路器的弧触头以及油断路器的主触头
铜石墨	机械强度比银石墨高，价较低，比银石墨易氧化	用作隔离开关自润滑抗短路的滑动触头和负荷开关的换向触头

3.3 低压电器用电触头材料的选用原则

低压电器用电触头材料的选用原则列于表 4.1-18 中。

表 4.1-18 电触头材料的选用原则

应用条件	选 用 材 料
要求确保安全、不得熔焊的场合，如线路保护开关、铁路信号继电器等	烧结挤压法 AgC、AgW、AgWC、AgCdO
交流接触器	细晶银、AgCu、AgNi(10)、AgFe(7)
20A 以下	AgFe(7)、AgCdO(12)、$AgSnO_2$(12)
40A 以下	$AgSnO_2$、AgCdO(12)、$AgSnO_2$(12)
60～100A	AgCdO(12)(15)、$AgSnO_2$
150A	AgCdO(15)、$AgSnO_2$
200～400A	AgCdO(15)、$AgSnO_2$、AgWC(30)(40)、AgW(50)(65)
400～1000A	AgCdO(15)、AgWC(40)(50)、AgW(60)(65)(70)
直流接触器	AgWC(30)(40)(50)、AgWCNi、AgW(50)(60)(65)、AgCdO、$AgSnO_2$、CuW(50)(60)
空气断路器	
50～100A	AgCdO(12)(15)、AgNi(30)/ Ag-C(3)(5)、$AgSnO_2$(12-15)、AgNi(29)C(1)/AgC(3)、AgWC(10)C(3)、AgWC(10)Ni(1)C(2)
100～250A	$AgSnO_2$、AgCdO、AgWC(12)C(3)、AgWC(20)、AgWCNiC、AgWC(40)(50)(60)、AgNi(30)(40)/AgC(5)
250～600A	AgNi(30)(40)/AgC(5)、AgW(50)(60)(65)、AgWC(40)(50)、AgWC(35)Ni(5)
限流断路器及漏电断路器	AgCdO(10)(12)(14)(15)、$AgSnO_2$(10～15) AgZnO(8～15)
配电框架式断路器	
30A	AgCdO(12)(15)、$AgSnO_2$(12～15)、AgNiC
50A	AgCdO(12)(15)、$AgSnO_2$(12～15)、AgWC(20)(30)(40)、AgW(30)(40)(50)(60)
100A	AgWC(35)(40)(50)、AgWC(30)Ni(3～5) AgW(50)(60)
400A 以上	AgWC(50)、AgW(60)(65)
一般继电器	AgCdO(8)(10)(12)、AgNi(10)(15)、AgFe(7)、细晶银、$AgSnO_2$(8)(10)
过电流继电器	AgCdO(12)(15)、$AgSnO_2$(10)(12)、AgNi(15)(20)
按钮	AgCdO(10)(12)、AgNi(15)(20)、$AgSnO_2$(8)(10)
高中压油断路器	CuW(50)(60)(70)(80)
空气断路器	AgW(60)(65)(70)(80)、AgWC(50)(60)
SF_6 断路器	CuW(50)(60)(70)(75)(80)、CuWC(50)(60)、CuW(80)Ni(1～3)
汽车电器	$AgSnO_2$(10)、AgCdO(8)(10)(12)、AgNi(15)(40)、W、CuW(60)、AgW(30)(40)
家用电器	AgCdO(12)、$AgSnO_2$(10)(12)、AgNi(15)(20)

注 “选用材料”一栏中带括号的数字表示可选用的成分含量(质量分数)，如 AgW(60)(65)即表示 W 含量(质量分数)60%和 65%的 AgW 皆可选用，以“/”相隔的两种材料为一组配对材料。

3.4 低压电器用电触头的规格、形状及尺寸

3.4.1 平面、弧面及球面片状电触头

(1) 平面、弧面及球面片状电触头的基本形状如图 4.1-29～图 4.1-31 所示。

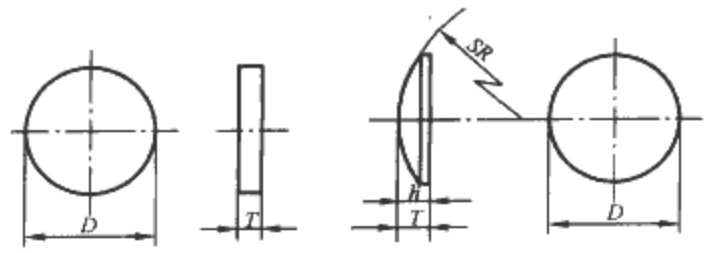


图 4.1-29 平面及球面圆形片状电触头的基本形状

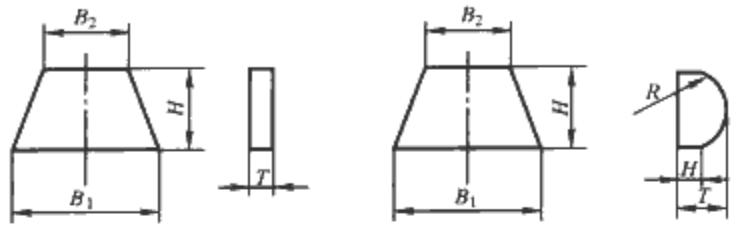


图 4.1-30 平面及弧面梯形片状电触头的基本形状

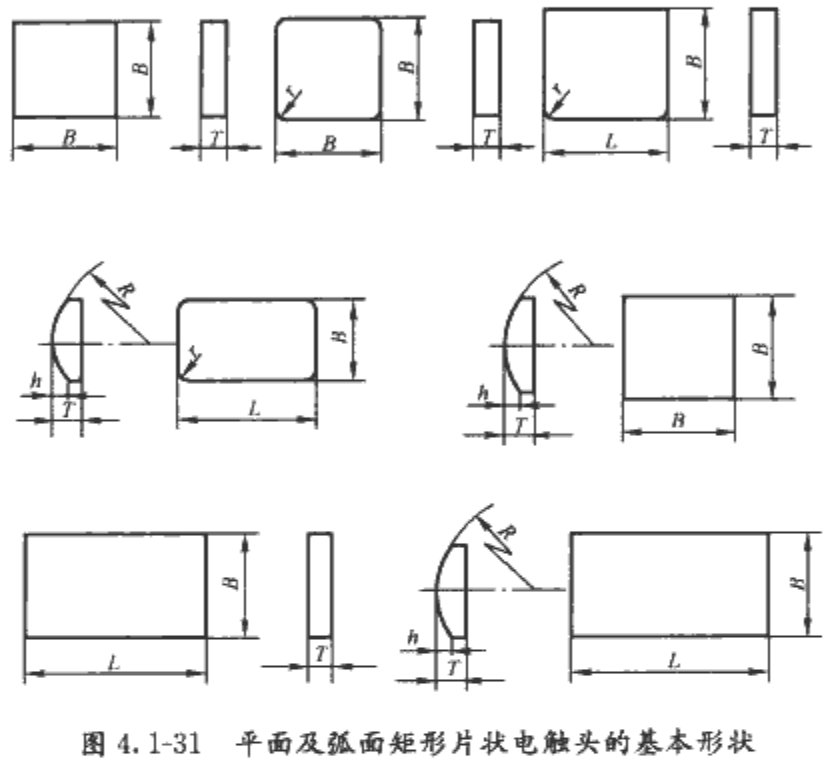


图 4.1-31 平面及弧面矩形片状电触头的基本形状

(2) 平面、弧面及球面片状电触头推荐选用尺寸见表 4.1-19～表 4.1-21。

表 4.1-19 平面及球面圆形片状电触头推荐使用尺寸

mm

D	R	T	
<2	$R=(D^2/4+h^2)/2h$	0.4	0.6
2.5		0.8	1.0
3		0.6	0.8
3.5			
4		1.0	1.2
4.5		1.4	1.5
5		1.6	1.8
5.5			
6			
6.5			
7		1.0	1.2
7.5		1.4	1.5
8		1.6	1.8
8.5		2.0	2.2
9			
10			
12		1.2	1.5
14		1.8	2.0
15		2.2	2.5
16			
18		1.5	1.8
20		2.0	2.2
22		2.5	3.0
25			

表 4.1-20　　**平面及弧面梯形片状电触头推荐使用尺寸**　　mm

H	B_1	B_2	R	T
8	3/3.5	2　2.5 3　3.5 4　4.5 5　5.5 6　6.5 8　8.5	$R=(H^2/4+h^2)/2h$	0.6　0.8 1.0　1.2 1.5　1.8 2.0　2.2
	4/4.5			
	5/5.5			
	6/6.5			
	8/8.5			
	10			
	12			
10	4/4.5	3　3.5 4　4.5 5　5.5 6　6.5 8　8.5 10		0.6　0.8 1.0　1.2 1.5　1.8 2.0　2.2
	5/5.5			
	6/6.5			
	8/8.5			
	10			
	12			
	14			
12	5/5.5	3　3.5 4　4.5 5　5.5 7　7.5 9　9.5 11		1.0　1.2 1.5　1.8 2.0　2.2 2.5
	6/6.5			
	8/8.5			
	10			
	12			
	14			
	16			
13	5/5.5	4　4.5 5　5.5 6　6.5 8　8.5 10 12		1.0　1.2 1.5　1.8 2.0　2.2
	7/7.5			
	9/9.5			
	11			
	13			
	15			
	17			
14/15	6/6.5	4　4.5 5　5.5 6　6.5 8　8.5 10 12		1.0　1.2 1.5　1.8 2.0　2.2 2.5　3.0
	8/8.5			
	10			
	12			
	14			
	15			
	18			
16/18	6/6.5	4　4.5 5　5.5 6　6.5 8　8.5 10 12 14	$R=(H^2/4+h^2)/2h$	1.0　1.2 1.5　1.8 2.0　2.2 2.5　3.0
	8/8.5			
	10			
	12			
	14			
	17			
	20			
20/22	8/8.5	6　6.5 8　8.5 10 12 14 17 20		1.2　1.5 1.8　2.0 2.2　2.5 3.0　3.2
	10			
	12			
	14			
	17			
	20			
	22			
	25			

表 4.1-21　　**平面及弧面矩形片状电触头推荐使用尺寸**　　mm

L	B	R	r	T
4　4.5	3 3.5 4 4.5	$R=(B^2/4+h^2)/2h$	1.0～1.2	0.6　0.8 1.0　1.2
5　5.5	3 3.5 4 4.5 5 5.5		1.0～1.2	0.6　0.8 1.0　1.2 1.4　1.5
			1.5～2.0	
6　6.5	3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5		1.0～1.2	0.8 1.0　1.2 1.4　1.5 1.6　1.8
			1.5～2.0	
8　8.5	4 4.5 5 5.5 6 6.5 8 8.5		1.0～1.2	1.0　1.2 1.4　1.5 1.6　1.8 2.0　2.2
			1.5～2.0	
10　10.5	4 4.5 5 5.5 6 6.5 8 8.5 10		1.0～1.2	1.0　1.2 1.4　1.5 1.6　1.8 2.0　2.2
			1.5～2.0	
			2.5～3.0	

续表

L		B	R	r	T
11.5	12	5 5.5 6 6.5 8 10 11 12	$R=(B^2/4+h^2)/2h$	1.5～2.0 2.5～3.0	1.2 1.4 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.5
13.5	14	5 5.5 6 6.5 8 8.5 10 13 14		1.5～2.0 2.5～3.0	1.2 1.4 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.5 2.8 3.0
15	16	6 6.5 8 8.5 10 12 14 16		1.5～2.0 2.5～3.0	1.2 1.4 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.5 2.8 3.0
17	18	6 6.5 8 8.5 10 12 14 16 18		1.5～2.0 2.5～3.0	1.4 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.5 2.8 3.0
19	20	8 8.5 10 12 14 16 18 20		1.5～2.0 2.5～3.0 3.5～4.0	1.4 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.5 2.8 3.0
21	22	10 12 14 16 18 20 22		2.5～3.0 3.5～4.0	1.4 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.5 2.8 3.0
24	25	10 12 16 18 20 22 25		2.5～3.0 3.5～4.0	1.5 1.8 2.0 2.2 2.5 2.8 3.0 3.2
26	28	12 16 20 22 24 26 28		2.5～3.0 3.5～4.0	1.5 1.8 2.0 2.2 2.5 2.8 3.0 3.2
30	32	12 16 18 20 25 30 32		2.5～3.0 3.5～4.0 4.5～5.0	2.0 2.2 2.5 2.8 3.0 3.2 3.5 4.0
35	38	14 16 20 25 30 32 35 38		2.5～3.0 3.5～4.0 4.5～5.0	2.0 2.2 2.5 2.8 3.0 3.2 3.5 4.0
40	45	14 16 20 25 32 36 40 45		2.5～3.0 3.5～4.0 4.5～5.0 5.5～6.0	2.2 2.5 2.8 3.0 3.2 3.5 4.0 4.5
50	55	16 20 25 32 36 40 45 50 55		2.5～3.0 3.5～4.0 4.5～5.0 5.5～6.0 6.5	2.2 2.5 2.8 3.0 3.2 3.5 4.0 4.5 5.0

(3) 平面、弧面及球面片状电触头的长度、宽度、外径　　等外形尺寸的极限偏差为 IT13 也可采用表 4.1-22 的规定。

表 4.1-22　　平面、弧面及球面片状电触头外形尺寸的极限偏差　　mm

D, L, H, $B(B_1, B_2)$		T				
公称尺寸	允　差	公称尺寸	允　差			
			轧制、挤压合金电触头	内氧化合金电触头	粉末压制合金电触头	熔渗合金电触头
≤3	+0.04 −0.10	0.4～1.0	−0.06	−0.10	−0.12	−0.15
>3～6	+0.06 −0.12	>1.0～1.5	−0.10	−0.12	−0.15	−0.20
>6～10	+0.08 −0.15	>1.5～2.0	−0.12	−0.15	−0.20	−0.25
>10～18	+0.10 −0.17	>2.0～3.0	−0.15	−0.20	−0.25	−0.30
>18～30	+0.12 −0.21	>3.0	−0.20	−0.25	−0.30	−0.40
>30～50	+0.14 −0.25					
>50～80	+0.16 −0.30					

(4) 平面、弧面及球面片状电触头厚度(T)的极限偏差为：当 T>1mm 时，除熔渗合金电触头为 IT15 外，其余为 IT14，也可按表 4.1-22 的规定；当 T≤1mm 时，按表 4.1-22 的规定。

(5) 弧面及球面片状电触头的弦高(h)或球缺高(h)与电触头厚度(T)的关系一般为：h≤0.4T。

(6) 对 T=1mm 及以上平面片状电触头的工作面、焊接面，如需要也可以制作或斜纹、网纹滚花(见图 4.1-32)或其他图形。

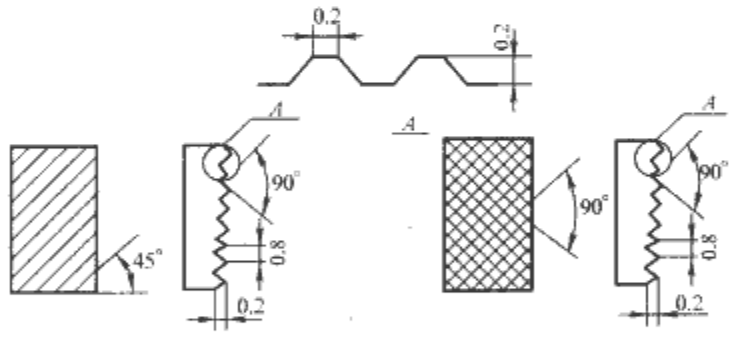


图 4.1-32　平面片状电触头工作面、焊接面斜纹、滚花图

3.4.2　平面及球面铆钉电触头

(1) 平面及球面铆钉电触头的基本形状如图 4.1-33 所示。

(2) 平面及球面铆钉电触头推荐选用尺寸及其极限偏差见表 4.1-23。

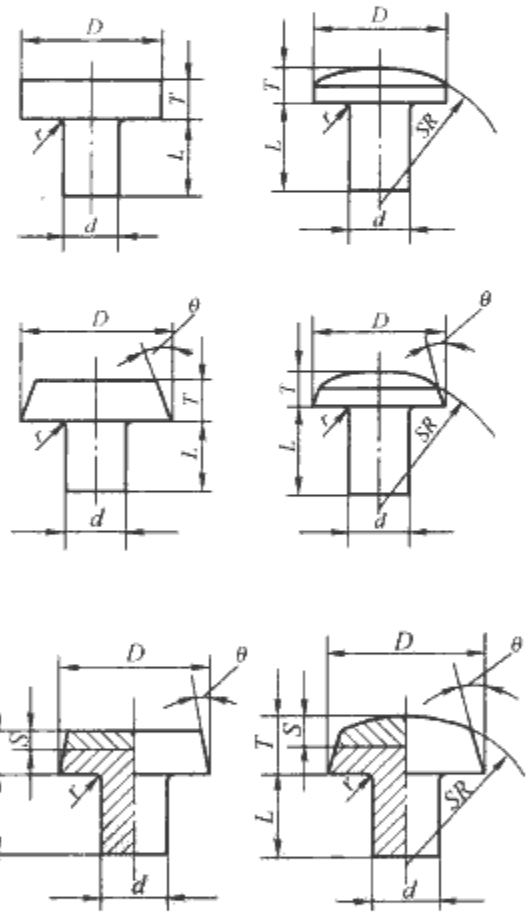


图 4.1-33　平面及球面铆钉电触头的形状

表 4.1-23　　平面及球面铆钉电触头推荐选用尺寸、极限偏差

D(mm) ±0.1				T(mm) ±0.05	d(mm) −0.02 −0.10			L(mm) +0.15			R(mm)		r(mm)	S(mm)	θ(°)
2.0	2.2	2.5	2.8	0.6	1.0	1.2	1.5	1.0	1.2	1.5	4	6	0.1	0.2～0.4	7～11
				0.8										0.3～0.5	
				1.0											
				1.2										0.5～0.7	

续表

D(mm) ±0.1				T(mm) ±0.05	d(mm) $^{-0.02}_{-0.10}$			L(mm) +0.15			R(mm)		r(mm)	S(mm)	θ(°)
3.0	3.2	3.5	3.8	0.8	1.5	1.8	2.0	1.2	1.5	2.0	6	8	0.1	0.3～0.5	
				1.0											
				1.2										0.5～0.7	
				1.5										0.7～0.9	
4.0	4.2	4.5	4.8	1.0	2.0	2.2	2.5	1.5	2.0	2.5	8	10	0.2	0.3～0.5	7～11
				1.2										0.5～0.7	
				1.5										0.7～0.9	
				2.0										0.9～1.1	
5.0	5.2	5.5	5.8	1.0	2.5	2.8	3.0	2.0	2.5	3.0	10	15	0.2	0.3～0.5	
				1.2										0.5～0.7	
				1.5										0.7～0.9	
				2.0										0.9～1.1	
6.0	6.2	6.5	6.8	1.0	3.0	3.2	3.5	2.5	3.0	4.0	15	20	0.2	0.3～0.5	9～15
				1.2										0.5～0.7	
				1.5										0.7～0.9	
				2.0										0.9～1.1	
8.0	8.2	8.5	8.8	1.2	4.0	4.2	4.5	3.0	4.0	5.0	25	40	0.2	0.5～0.7	
				1.5										0.7～0.9	
				2.0										0.9～1.1	
				3.0										1.1～1.6	

(3) 铆钉电触头尾部直径 d 一般为 $0.5D$。

(4) 铆钉电触头工作面复合层厚度 S 与头部厚度 T 的关系一般为：$S=(0.3\sim0.65)T$。

(5) 铆钉电触头头部直径 D 与尾部直径 d 的同轴度应符合表 4.1-24 的规定。

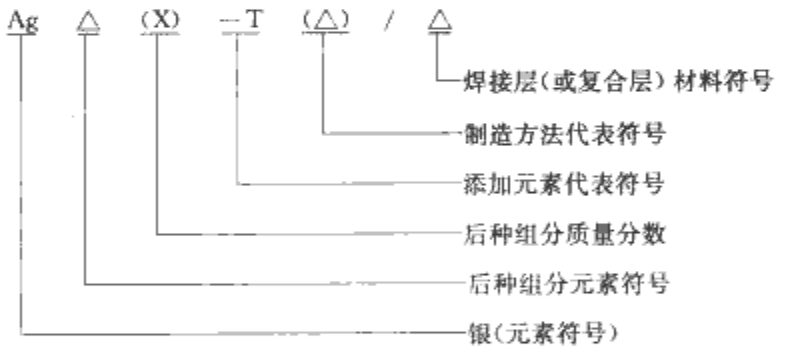
表 4.1-24 产品头部与尾部的同轴度 mm

头部直径	2.5～3	>3～6	>6～8
同轴度(≤)	0.12	0.15	0.20

3.4.3 银基电触头的符号及标注

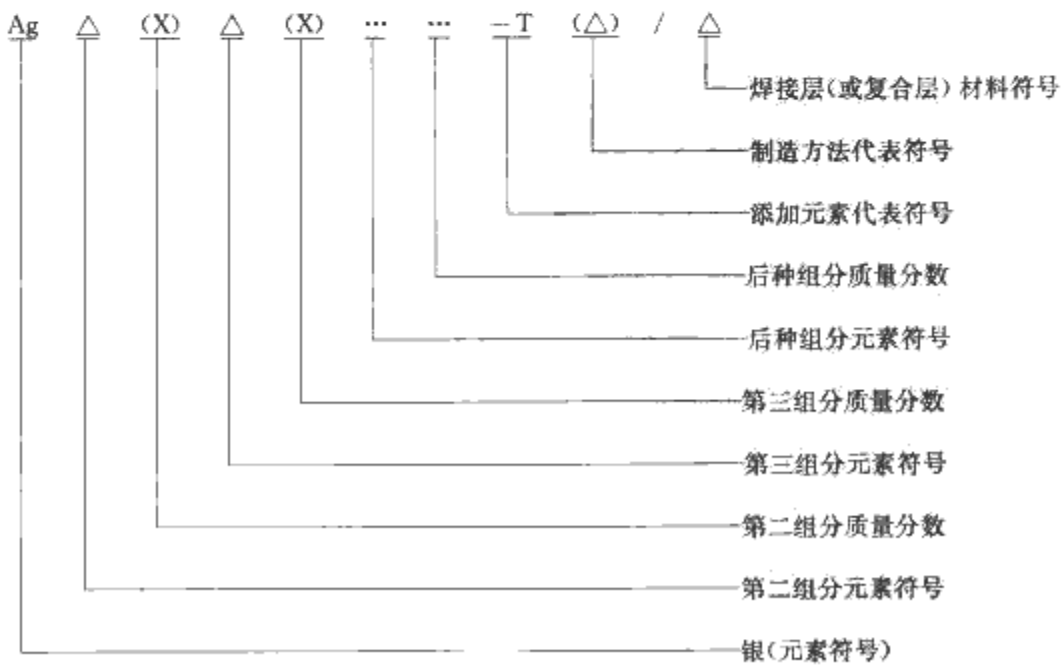
(1) 银基电触头的符号：

1) 二元组分银基电触头代表符号的标注方法如下：



注：制造方法——(I. O)代表合金内氧化法，(P. M)代表粉末冶金法。

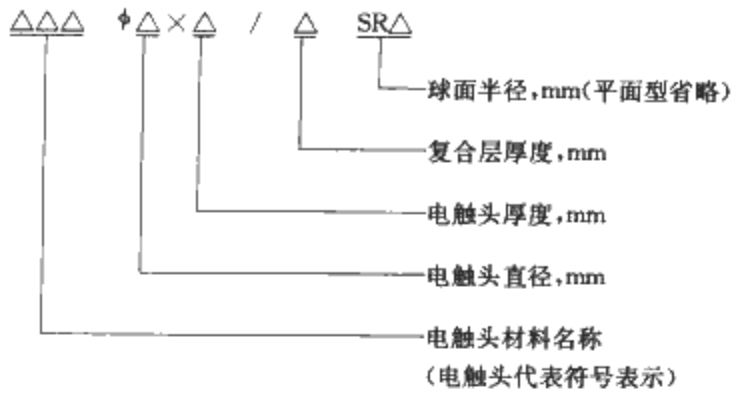
2) 三元组分及多元组分银基电触头代表符号的标注方法如下：



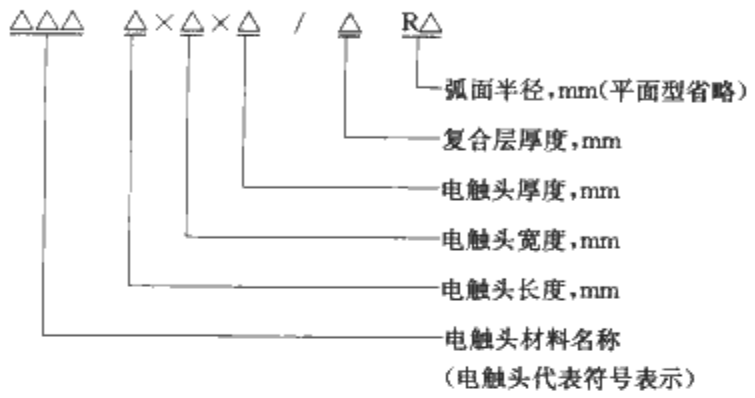
注：制造方法——(I. O)代表合金内氧化法，(P. M)代表粉末冶金法。

(2) 银基电触头的标注：

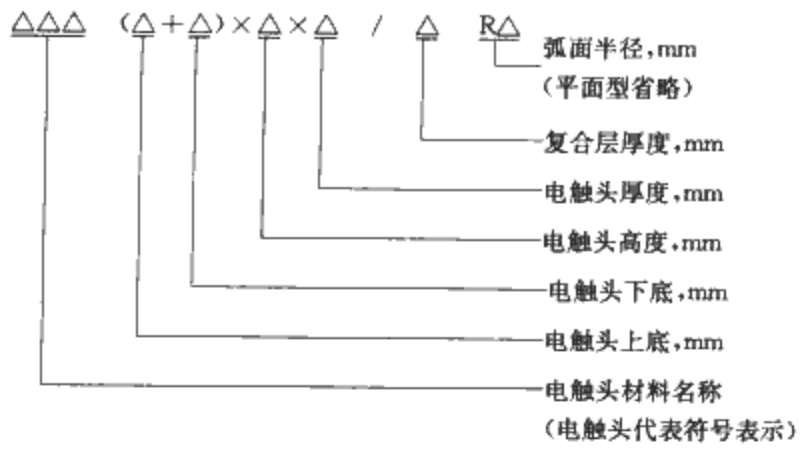
1) 圆形片状电触头的尺寸标注方法如下：



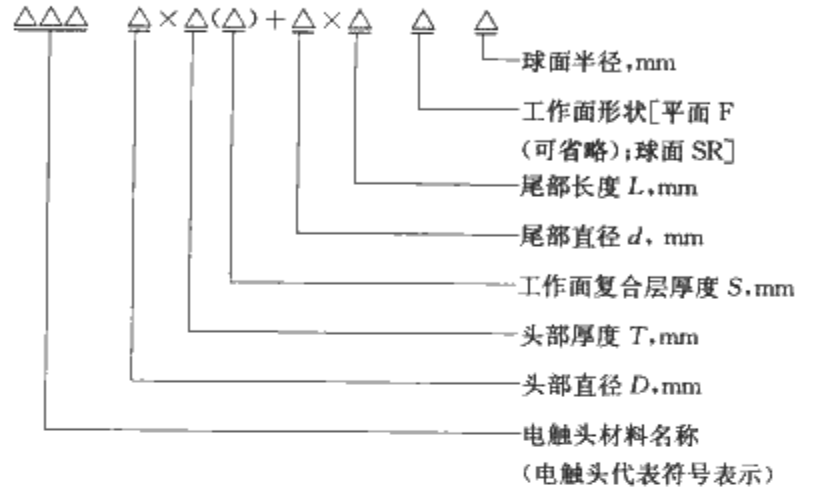
2) 矩形片状电触头的尺寸标注方法如下：



3) 梯形片状电触头的尺寸标注方法如下：



4) 铆钉电触头的尺寸标注方法。



银基电触头的尺寸标注示例见表 4.1-25。

表 4.1-25　　银基电触头的尺寸标注示例

电触头类型			电触头材料	电触头尺寸	标注方法	
圆形片状电触头	平面型	单层	AgNi(10)	D=6mm T=1.5mm 铜层厚 1.0mm 球面半径 8mm	AgNi(10)	φ6×1.5
		铜复合层	AgNi(10)/Cu		AgNi(10)/Cu	φ6×1.5/1.0
	球面型	单层	AgNi(10)		AgNi(10)	φ6×1.5 SR8
		铜复合层	AgNi(10)/Cu		AgNi(10)/Cu	φ6×1.5/1.0SR8
矩形片状电触头	平面型	单层	AgCdO(12)	L=10mm B=5mm T=1.5mm 银层厚 0.2mm 弧面半径 R=8mm	AgCdO(12)	10×5×1.5
		银焊接层	AgCdO(12)/Ag		AgCdO(12)/Ag	10×5×1.5
	弧面型	单层	AgCDO(12)		AgCdO(12)	10×5×1.5 R8
		银焊接层	AgCdO(12)/Ag		AgCdO(12)/Ag	10×5×1.5 R8
梯形电触头	平面型	单层	AgNi(30)	H=15mm　B_1=10mm B_2=6mm　T=3mm 银层厚 0.2mm 弧面半径 R=8mm	AgNi(30)	(6+10)×15×3
		银焊接层	AgNi(30)/Ag		AgNi(30)/Ag	(6+10)×15×3
	弧面型	单层	AgNi(30)		AgNi(30)	(6+10)×15×3 R8
		银层焊接	AgNi(30)/Ag		AgNi(30)/Cu	(6+10)×15×3 R8
铆钉电触头	平面型	整体	AgNi(10)	D=4mm　d=2mm T=1.5mm　L=2.5mm S=0.7mm 球面半径 R=8mm	AgNi(10)	4×1.5+2×2.5F
		铜复合	AgNi(10)/Cu		AgNi(10)/Cu	4×1.5(0.7)+2×2.5F
	球面型	整体	AgNi(10)		AgNi(10)	4×1.5+2×2.5SR8
		铜复合	AgNi(10)/Cu		AgNi(10)/Cu	4×1.5(0.7)+2×2.5SR8

4　中高压电器用电触头材料

额定电压 3.6kV 及以上的开关设备称为中高压电器。这类电器是电力系统中最重要的控制和保护设备，无论电力线路处在什么状态，例如空载、负载或短路故障，当要求带电动作时，它都应能可靠地动作，或是关合、或是开断电路。

高压电器包括高压断路器、隔离开关、熔断器、复合开关、电压互感器与电流互感器、避雷器、限流电抗器及组合电器与成套电器等。

高压断路器是高压电器中最重要的一种电器，其主要功能是在电力系统正常运行和故障情况下，切断、闭合各种负载、过载、空载和短路故障的电流。在断路器的结构中，动、静触头是断路器的基本执行元件之一，担负着接通、承载与分断正常工作电流和故障电流的职能，它直接关系到电力系统的安全运行和可靠性。它们的工作条件和其他元件比较起来，苛刻而繁重。在高压电力系统中，切断短路电流时，要产生强烈的电弧(静态断路器除外)。电压越高，电流越大，产生的电弧能也越大，越不容易熄灭。因此，可以说研究中高压电器用触头材料的重点就是研究高压断路器用触头或触头元件。

根据断路器灭弧原理划分，有油断路器(多油和少油)、

空气断路器、SF_6 断路器、真空断路器、磁吹断路器和（固体）自产气断路器等。自 20 世纪 70 年代后期，10～35kV 等级的多油和少油断路器与开关逐渐被真空断路器和 SF_6 断路器所取代。目前，12～40.5kV 等级范围内以真空断路器为主，其他电压等级中多以 SF_6 断路器为主。

SF_6 断路器是使用 SF_6 作为灭弧和绝缘介质，而真空断路器是利用真空作为触头间的绝缘与灭弧介质。鉴于它们的工作条件完全不同，所用的触头材料也不同．本节仅论及高压断路器用触头材料，并以 SF_6 断路器用铜钨触头材料及其元件为重点。真空开关用触头材料将在本章 5 真空开关用触头材料中叙述。

4.1 高压断路器用触头材料

4.1.1 触头受电弧作用时的物理化学现象

断路器在空载操作时，动、静触头间发生的碰撞和摩擦，会造成触头的变形和触头材料的损耗，这一现象称为机械磨损。一般说来，高压断路器触头的机械磨损并不严重。断路器开断电路时，触头间要产生电火花或电弧，电弧的高温作用会使触头表面烧损、变形、金属材料流失，造成触头的电磨损，这一现象在断路器开断短路电流时尤为严重。电弧的高温作用于触头时，触头上会发生强烈的物理、化学变化，这些变化可归纳如图 4.1-34 所示。

当开断电流在几 A 以上、1kA 以下的电流范围内时，触头上发生的化学现象对触头的电磨损起着比较重要的作用。此时，不同触头种类在所处的介质中产生的触头电磨损差异很大，如低熔点金属铜、银等在变压器油中会产生严重磨损，而难熔金属钨、钼及铜钨、银钨等在变压器油中却无异常磨损现象。但开断 1kA 以上的大电流时，在电弧能量相同的条件下，其化学现象造成的磨损将居次要地位，此时电磨损主要由触头材料的气化造成。

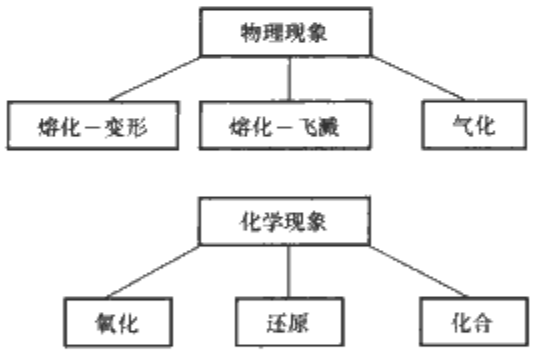


图 4.1-34 触头受电弧作用时的物理化学现象

此外，作为 SF_6 断路器的灭弧介质 SF_6 气体，将在电弧放电过程中随温度的增高而分解。在电弧作用下，SF_6 分解形成低氟化合物 SF_2、SF_4 以及氟原子、硫原子，同时还存在化合作用生成的 S_2 与 F_2，此外氟原子捕获电子形成 F^- 负离子等等。因此，触头材料不仅要耐化学介质腐蚀，而且在开断过程中不应释放与 SF_6 发生作用的气体及杂质，以减少触头的损耗。

处于灭弧介质高电位的触头除要能承受介质的腐蚀外，在开断短路故障电流时，还要经受短路电流的热效应；在关合断路故障时，要经受间隙电压击穿等非常复杂的电弧物理过程，此时的工作条件最为严酷。

综上所述，高压断路器对电接触的设计须提出的基本要求是：

（1）接触电阻值要小而且要稳定，保证触头闭合时不降低电导率，在长期使用过程中接触电阻不会自动变大，使触头的温升始终不超过规定的允许值。

（2）有足够的耐压强度，保证触头断开电路时，不被线路正常或非正常电压击穿。

（3）触头的材料转移和侵蚀量减至最小，保证触头由闭合过渡到断开或由断开过渡到闭合的一段过渡过程时，产生的液桥和电弧不发生熔焊或触头材料的喷溅。

（4）电磨损尽可能小，在开断过程中不因烧蚀磨损严重而影响触头的使用寿命。

4.1.2 中高压电器对触头材料的要求

为满足高压断路器对电接触设计的基本要求，正确选用触头材料十分关键，所选的触头材料需要具备以下一些性能：

（1）导电导热性良好。

（2）耐电压强度高。

（3）抗电弧烧损性好。

（4）抗熔焊性高。

（5）一定的抗拉强度和硬度。

（6）耐化学介质腐蚀性。

（7）良好的加工性能。

触头在开断过程中，在电弧的作用下会产生电腐蚀和烧损的现象，因此在受电弧作用的地方应采用耐弧合金作灭弧触头。但这种材料的接触电阻太高，不利于通过正常工作电流，所以在正常电流通过的地方，应采用纯铜或铜合金作主触头。但没有一种金属材料能完全满足上述弧触头的要求。因此，只有通过合金化或粉末冶金方法，按性能的要求将几种金属或金属与非金属进行合理组合，才能得到较为理想的触头材料。

难熔金属钨(W)显示出一系列的优异性能——它是金属中熔点最高的元素，其汽化点很高(触头材料常用金属的汽化点见表 4.1-26)，具有很高的硬度与强度。作为电触头材料，它还有良好的抗机械磨损和抗电弧烧蚀性能。在金属中除了银(Ag)、铜(Cu)、金(Au)、铝(Al)等元素外，钨也具有相对较高的导电与导热性，因此它成为电触头材料中被优选的基体材料。近几十年来纯钨已被广泛用作触头材料，通常称为钨触点。其主要用于小型电器的电触头，如作转换程序极快的触头、汽车点火用断路器、调节器以及电话中的脉冲触头。可作为其支承材料的有铜、铁(Fe)、银、镍(Ni)及它们的合金。

表 4.1-26 触头材料常用金属的汽化点

材 料	钨	钼	铁	铜	银	锡
汽化点(℃)	5927	4803	2998	2595	2001	2270

钼(Mo)的大多数物理、化学性能与钨相似，虽然钼的熔点、硬度等较钨为低，但它仍属于高熔点金属。钼较钨的优点是其密度几乎为钨的一半，可使电触头的质量大为降低。作为电触头材料，钼的抗机械磨损和抗电弧烧蚀性不如钨，其抗氧化性和抗腐蚀性也比钨差，钼存贮量也不如钨大，而价格要高于钨。因此，以钼为基体制造触头材料远不如钨的应用广泛。

铜的熔点和汽化点低，电磨损主要由金属汽化及金属液体飞溅造成，抗电磨损的性能差，但它们的导电、导热性却十分良好。如能弥补这些短处，就可作为理想的触头材料。纯金属钨和铜的物理性能见表 4.1-1(表 4.1-1 见本章第 1 节《电触头与电接触》)。

当用粉末冶金方法使具有高熔点、高硬度和高强度的钨与高导电性、导热性好的铜制成铜-钨复合材料时，这种复合材料集合了它们各自的优点，其导电性、导热性较金属

W 有了很大的提高。作为触头材料，它即有很好的抗电弧腐蚀与抗机械磨损及耐高温的性能，又有铜的高电导率与热导率，且有良好的塑性及加工性。而且铜在电弧高温下蒸发时可吸收大量的电弧能量，降低电弧温度，可有效地改善工作条件和降低电腐蚀作用。虽然铜钨复合材料具有较好的综合性能，但铜、钨均易氧化，铜钨触头在空气中通断时，接触部位会发生氧化，持续电流较高时能引起触头过热。因此该材料适用于没有持续电流通过和开关电弧作用的场合以及受机械应力作用极强的场合。例如：少油断路器、多油断路器、SF_6 断路器、真空接触器、中压范围负荷开关、高压范围负荷开关、变压器转换开关等的主触头上的引弧部分或弧触头。国内外的中高压电器一直广泛采用这种复合材料作弧触头。作为通过持续电流的主触头，则主要用于油开关。

弧触头的性能与制造方法密切相关，并随材料中两种不同金属的重量百分比的不同而有变化。

4.1.3　触头的性能与触头结构及开关参数的关系

在电器实际运行中，每个电器中触头的性能还取决于众多的非触头本身的因素，如触头的结构与尺寸、分断与闭合速度、接触压力、接触弹跳、环境变化、装配技术及装配偏差大小等因素。

触头分断速度对电磨损的影响是很大的。因此在分断过程中，从触头磨损的角度考虑，要求有大于一定临界值的分断速度，这是因为在触头分离瞬间会产生电弧，由于接触表面沸腾而产生的材料汽化和熔融物在弧柱作用下被强烈地加热，接着会平行于触头表面向外流出。如果速度快，间隙足够大，则这些热气体与大部分接触表面之间被较厚的、冷的附面层所隔开，对触头表面的伤害较小；如果速度过慢，触头间隙又很小，将使被加热的等离子体蒸汽以较高的速度流过触头表面，结果使大部分热量输送到触头表面，严重地引起大面积熔化。当严重的熔化现象与高速气体擦过触头表面同时存在时，大块的触头材料可能脱落，就会出现严重的触头磨损。

为减少触头的熔焊，在断路器的设计上常采取以下措施：

（1）增加并保证必需的接触压力。

（2）减少触头的振动。

（3）加大并保证必需的合闸速度，以减少触头预击穿的时间。

此外在电弧燃烧时，由于 SF_6 分解的气体与触头材料及电极材料蒸汽反应的结果，容易形成细粉状的氟化物。这类氟化物具有很低的电导率，当它们沉淀在灭弧室的内表面上时虽不会明显地降低灭弧室的电绝缘性能，但它们若集结在触头上，则有害于接触电阻。所以，SF_6 的触头设计应具有自清扫的作用，以保证触头的工作性能。

触头结构的改变将引起触头制造技术的变化。20 世纪 60 年代初，法国 DRELLE 公司、MG 公司和瑞士 BBC 公司在 SF_6 断路器中采用一种新型的触头元件——自力型触头，并以触指/弹簧结构代替过去弧触头中的动触头，由此产生了目前实际使用的 CuW/CrCu、CuW/Cu 或 CuW/Fe 等整体触头元件（把电触头与导电部件连接为一体），它提高了断路器通断过程的可靠性，使触头结构简化，这是中高压断路器触头结构设计中重大变化的一个明显例子。为获得整体触头元件，此后出现了多种制造弧触头及其连接件的方法，某些方法还会影响弧触头的性能。

实践已证明，能否寻找到最适合高压电器的触头材料，并使触头材料发挥它的最大功能，取决于电器设计者和触头制造者紧密合作的程度。

4.2　铜钨电触头材料的牌号、成分及其主要性能

GB/T 8230—2003《铜钨及银钨电触头》规定了铜钨及银钨电触头的基本要求。表 4.1-27 列出了在一定组成范围内铜钨电触头对应的化学成分及其主要性能。由于制造工艺的需要或为改善某些性能而添加微量元素、钨粉的形状、粒度和粒度分布的影响以及制造工艺的差异，将会导致实际产品的性能在一定范围内与表中的数值略有差异。

至今，尚未有能够反映电触头材料抗电弧腐蚀的性能指标评价体系，而只能用与生产工艺有关的机械物理特性参数及金相组织实现间接控制。电触头材料的最终选定，需在材料成分、工艺、触头结构与尺寸等条件确定的情况下以能通过用户特定的电器实际使用条件下的电性能试验为准。

（1）材料的密度主要取决于材料的组成，但相同组成的产品，其密度取决于制造工艺对产品致密程度的影响。一般来说，铜钨电触头产品的密度不应小于其实际成分理论密度的 96%。

（2）材料的电导率明显随所含的高导电组分铜含量的增大而增加，但相同组成的产品，致密程度愈高，其电导率也高。此外，影响更大的是这些产品是否添加微量元素（如烧结活化剂金属镍）和添加量的多少。如果添加，而且添加量愈大，则愈降低材料的电导率。一般来说，触头电导率应尽量和回路电缆的电导率相同。

（3）材料的硬度取决于所含的硬质相 W 的含量，但同时也受添加微量元素多寡的影响，并与材料所处的状态有关。

（4）材料的金相组织对触头的电弧烧蚀影响很大。产品的金相组织应分布均匀。

几种典型成分的铜钨电触头的金相组织见图 4.1-35。

表 4.1-27　铜钨电触头材料的化学成分及其物理力学性能

产品名称	化学成分(%)			物理力学性能							Cu 的体积分数(%)
	Cu	杂质总和 ≤	W	密度 (g/cm^3) ≥	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$) ≤	电导率 (%)IACS ≥	布氏硬度 (HB) ≥	抗弯强度 (MPa) ≥	熔点 (℃)	热导率 [W/(m·K)]	
CuW(50)	50±2.0	0.5	余量	11.85	3.2	54	115	—	1083	200	68
CuW(55)	45±2.0	0.5	余量	12.30	3.5	49	125	—	—	—	—
CuW(60)	40±2.0	0.5	余量	12.75	3.7	47	140	—	1083	195	59
CuW(65)	35±2.0	0.5	余量	13.30	3.9	44	155	—	—	—	—
CuW(70)	30±2.0	0.5	余量	13.80	4.1	42	175	790	1083	175	48
CuW(75)	25±2.0	0.5	余量	14.50	4.5	38	195	885	—	—	—

续表

产品名称	化学成分(%)			物理机械性能							Cu 的体积分数(%)
	Cu	杂质总和 ≤	W	密度 (g/cm^3) ≥	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$) ≤	电导率 (%)IACS ≥	布氏硬度 (HB) ≥	抗弯强度 (MPa) ≥	熔点 (℃)	热导率 [W/(m·K)]	
CuW(80)	20±2.0	0.5	余量	15.15	5.0	34	220	980	1083	160	42
CuW(85)	15±2.0	0.5	余量	15.90	5.7	30	240	1080	—	—	—
CuW(90)	10±2.0	0.5	余量	16.75	6.5	27	260	1160	1083	150	35

注 1. 杂质总和主要指 Fe、C、SiO_2 及碱金属 Na、K 的总量；为改善性能而加入的添加物不属杂质。

2. 导电度 IACS% 是以国际标准软铜(即退火铜)的电阻率 1.7241$\mu\Omega \cdot cm$ 为 100% 导电度。

3. 按照国际标准规定，延伸性较大的合金材料，如果其永久变形>0.3mm，则不宜做抗弯试验，如需要，应做抗拉试验。因此含钨量低的铜钨电触头没有抗弯强度试验。

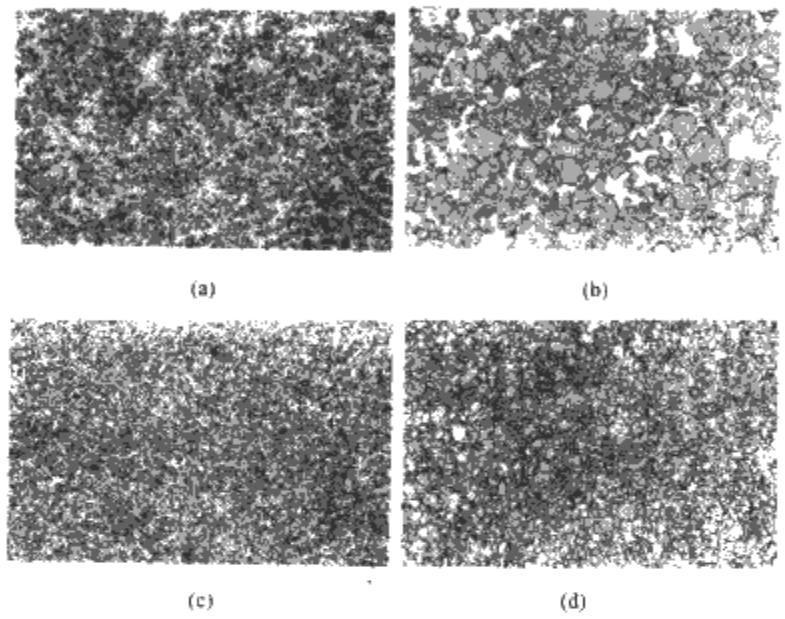


图 4.1-35 铜钨电触头金相组织

(a) CuW (60)；(b) CuW (70)；

(c) CuW (80)；(d) CuW (90)

4.3 铜钨电触头材料的制造

钨与铜既不互溶，也不形成化合物，只能采用粉末冶金方法制造由钨和铜组成的两相均匀分布的铜-钨触头系列复合材料。这种方法使这两种金属都各自保持了原来的物理机械特性，所以综合了铜的良好的导电性、导热性以及钨的耐磨性和抗熔焊性的优点，而且价格便宜、工艺简单。

制取 CuW 触头常采用粉末冶金 3 种基本类型的工艺：

(1) 压制—固相烧结—复压法。

(2) 压制—液相烧结—复压法。

(3) 压制－预烧骨架—熔渗法。

铜钨触头材料因化学组分含量的不同会使某些制造方法受到限制（在制造整体触头时，还可能因工艺选择的原因受到限制），因此会有不同的制造方法。不同制造方法的 CuW 复合材料有不同的电弧腐蚀机理，因而获得的性能也不同。

工艺 (1) 与工艺 (2) 是传统的粉末冶金方法。其过程为：先将钨粉和铜粉按所需成分的比例混合，如需添加诱导铜或活化剂镍，则可同时加入混合；将混合均匀的粉末置于压机上的模坯内压制成形，在保护性气氛下（一般为氢气）进行烧结。烧结可在低于铜熔点的温度下进行，此为固相烧结；烧结在高于铜熔点的温度下进行，则为液相烧结。但是，不论固相烧结或是液相烧结，烧结制品的相对密度很低，为理论密度的 85%～92%，因此，需要通过复压使其致密化，复压后，其相对密度可提高到 96%～98%。随着铜钨材料中的钨含量增大，复压所需的压力明显增大，复压致密化变得困难，所以这种方法比较适合于含钨量较低的材料或加工塑性比较好的材料。大多含钨<60% 的铜钨材料多采取这种方法制造。

工艺 (3) 采用了为制取 CuW 电触头而专门开发的预烧 W 骨架工艺，随后用铜熔渗而形成的 CuW 假合金的方法称为熔渗法。它的基本工艺是：将钨粉或掺入少量铜粉及活化剂镍等添加元素混合后压制成形，然后将压坯在保护气氛下预烧结成具有多孔性的 W 骨架；其孔隙按铜钨材料中铜的含量计算应渗入的铜量来控制；将铜片与骨架坯叠装置入保护气氛炉内，在超过铜的熔点的某一温度下保温，使铜通过毛细作用渗入到预烧的钨骨架内，冷却后得到致密的铜钨复合材料。这种触头的相对密度可直接达到 96%～99%，但是它对精确控制成分有一定的困难，因此生产的触头材料的成分允许有± (2%～3%) 的波动。

添加镍粉是为了增加钨和铜这两种互不相溶金属间的浸润性，以便提高铜钨的烧结密度和得到良好的溶渗效果。因为镍与铜可形成无限固溶体，而且镍与钨又能形成镍-钨金属化合物。不过，少量的镍在提高材料硬度的同时，也会降低其电导率，所以一般只加入钨铜总重的 0.15%～0.5%。

用不同方法制造同一种组分的 CuW 材料，其电弧烧蚀情况将有差别，图 4.1-36 显示了这种差别。用混粉-压制-烧结-复压制成的铜钨材料中，高熔点的 W 颗粒一般只镶嵌在

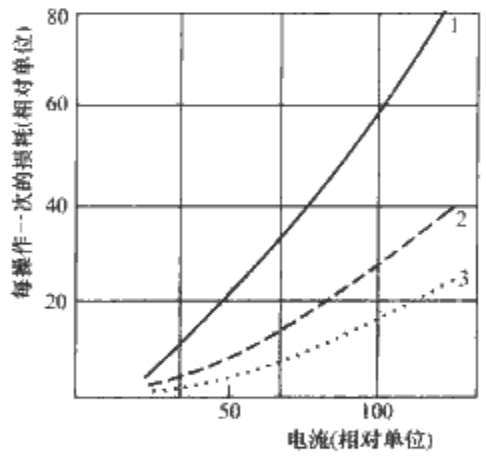


图 4.1-36 CuW80 的电弧烧蚀

1—混粉压制烧结复压法；2—液相烧结复压法；

3—预烧骨架，随后用铜熔渗法

较低熔点的第二组分 Cu 里，结果在燃弧时材料容易以液滴飞溅的形式喷射四周，随开断电流的加大，烧损将迅速增加。而预烧钨骨架—熔渗制成的铜钨材料，即使开断电流加大，烧损也要缓慢得多，显示出很好的抗电磨损性能。因为在高温工作时，熔点和汽化点高的钨在合金中形成空间交叉的骨架，骨架的熔化温度高于或接近熔渗金属铜的蒸发温度，这就基本决定了弧根的温度，铜在熔化和蒸发过程消耗

能量，避免弧根的温度进一步上升，这样骨架就几乎不熔化，也就得到了保护。只有当持续负荷的时间增长到熔渗的铜被贫化、耗尽时，部分骨架才开始烧蚀。为强电弧热量所熔化的铜液体，还因被吸附在钨骨架的毛细孔中，并因钨骨架的毛细管作用而保持，不会形成金属飞溅，燃弧时材料仅仅是以蒸发的形式烧损，也就是说，合金的电磨损主要是由汽化造成，故其自然烧蚀要小得多。此外，即使局部温度高达几千度，这种结构的触头也不致熔焊。正因为这种制造方法能使 CuW 材料获得如此良好的电弧烧蚀状况，才使熔渗法成为目前最为成功和最广泛采用的中高压电器中弧触头的制造方法。

4.4　粉末性能对铜钨电触头材料的影响

触头在使用中失效的因素极其复杂，除外部因素，即触头的工作环境、应用场合和工作特性外，触头的内部因素，即制造触头的原材料、工艺、触头尺寸与结构等也是影响触头性能的重要因素，这其中最为复杂的是原材料—粉末性能的影响。相对于成型压力、烧结温度与时间、熔渗温度与时间等制造工艺而言，最难确定且研究也最多的就是所选用的粉末化学、物理和工艺性能及其粒度组成与电触头性能的关系。

4.4.1　粉末氧含量的影响

氧含量高会影响铜钨材料的熔渗效果。而且当铜钨触头含氧高时，开断时电弧燃烧受热部位的气体会迅速膨胀，并在气孔中聚集形成大气孔，从触头表面的弧根部逸出，这将增加熔融金属的蒸发与喷溅，加速电弧对触头的烧蚀。表面吸附的氧可通过还原尽量去除，但如果有稳定的氧化物则是很难还原的，因此钨粉和铜粉的氧含量必须控制。通常制造铜钨触头前，需要对有氧化现象的钨粉、铜粉进行还原处理。从经济角度考虑，购买刚刚生产出的，并有防止氧化措施的“新鲜”原材料是一个不错的选择。

除此之外，钨粉中的铁含量过高会影响触头的电阻率；钾（K）与钠（Na）的存在则会极大地破坏钨粉的浸润性，因此均须加以控制。

4.4.2　钨粉的平均粒度对钨铜触头制造工艺及性能的影响

从触头的成形性能看，其影响为：细粉的成形性较差，成形压力要比粗粉大得多，且常会出现触头边缘分层现象；粉末太粗，比表面积小，粉末粒子间相互接触面积小，内聚力减少，压坯强度低。从耐电弧烧蚀性能看，其影响为：粉末愈细，其电弧烧损率越小，但触头成品表面易产生龟裂，导致其在电弧烧蚀过程中剥落，粉末越粗，烧损率越大。图 4.1-37 为典型的钨粉平均粒度与铜钨烧蚀特性的关系曲线。对于 CuW80 材料，选用粒度为 6～9μm 的钨粉较为适宜。

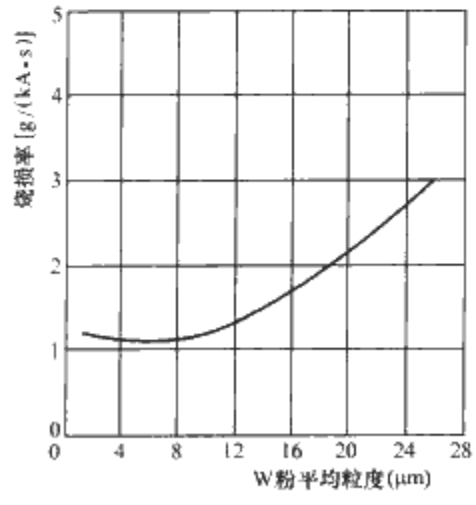


图 4.1-37　CuW80 在电流最大值为 110kA 时的烧损率与 W 粉平均粒度的关系

4.4.3　钨粉粒度分布的影响

钨粉的粒度分布（或称粒度组成）不仅影响压制成形等制造工艺，还影响铜钨金相组织，从而影响产品性能。理想的粒度分布应符合高斯曲线（即正态分布），而且细粉能均匀分布于粗粉之间。恰当的粒度组成可获得均匀的网络结构，无聚集成团或连成一片的组织。

4.4.4　钨粉对铜的熔渗性

研究与生产实践证明，即使钨粉的化学成分、平均粒度、松装密度等技术参数很好，但在相同工艺条件下，由于钨粉对铜的溶渗性不好，金相检验发现形成的铜钨触头会有明显的铜或钨的富集区，组织不均匀，甚至有空洞等缺陷。这种情况下的钨粉对铜的熔渗性就要从制备钨粉的原材料的源头寻找原因。

总之，原材料对铜钨触头产品的性能有着重要的影响，在生产实践中其影响又是多种因素交织且复杂多变。触头材料的制造者除参考有关铜钨电触头用钨粉的技术标准外，更要根据制定的铜钨触头工艺认真摸索适合该工艺最佳原材料的所有重要参数。

4.5　整体触头（自力型）

传统的六氟化硫断路器触头元件为装配式结构，是由触座、弧触指、压紧弹簧、限位卡圈及其他附件组成的触指/弹簧结构的触头系统，见图 4.1-38。这种结构靠弹簧产生接触压力，其构件多、构造复杂，很难保证各触指间性能一致，而且弹簧受热后会影响其可靠性。随着材料和制造工艺的进步，国外在 20 世纪 70 年代出现了一种不需外部加弹簧而自身具有弹力的自力型整体触头的新型结构，其头部为铜钨耐弧触头材料，大多为 CuW(80)、CuW(70)或 CuW(60)等，尾部一般为高弹力的铬青铜(CrCu)导电材料或用强化处理后的紫铜(Cu)或铝合金或钢材等。目前高压断路器都采用这种触头结构，它使动、静触头达到一定夹紧力的效果，见图 4.1-39。这种触头结构简单、提高了可靠性且安装与使用也方便。由于其体积进一步缩小，更有利于提高灭弧室的开断特性。但它同时也向高压触头材料制造者提出新的制备技术的要求，即：除要生产符合要求的 CuW 系列耐弧触头材料和 CrCu 导电材料外，还要完成它们之间的可靠

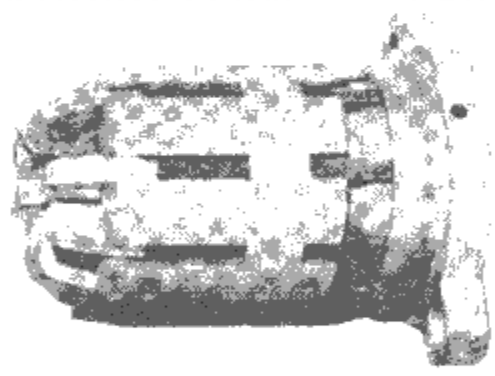


图 4.1-38　触指/弹簧结构的触头系统

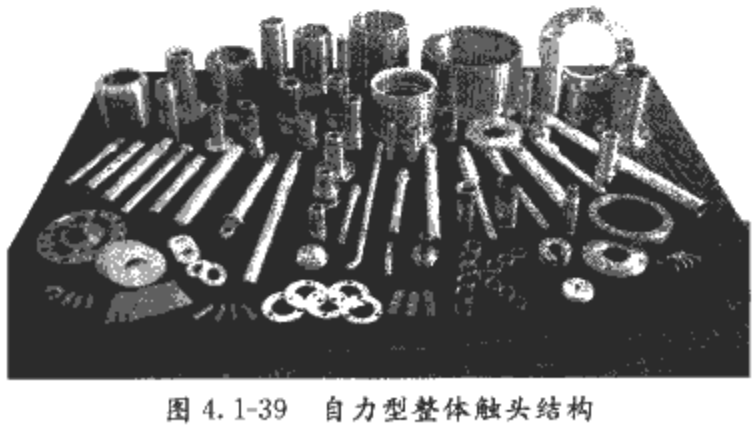


图 4.1-39　自力型整体触头结构

连接。

4.5.1 对自力型整体触头的要求

国标 GB/T 8320—2003 规定铜钨整体电触头元件的铜钨触头与导电端接合面的抗拉强度不小于 185MPa，并规定了导电端铜及铜合金的化学成分与物理机械性能，见表 4.1-28。而实际应用中，国内外电力设备制造公司在设计 GIS（SF_6气体绝缘全封闭组合电器）时，为减小隔离开关的尺寸，将 CuW 触头与 CrCu 材料的结合强度规定为 196MPa，也有认为结合面强度应不小于 226MPa，并要求导电端的铜或铜合金的抗拉强度标准值为 275MPa，都高于国标的规定。

目前，自力型整体触头的尾部导电端大多采用合金牌号为 QCr0.5 的高弹力铬青铜棒材（当导电端毛胚直径小于或等于 ϕ85mm 时，棒材经锻造加工即可使用）或成分与铬青铜相似且经过热处理后能达到所需性能的 CrCu 合金铸块。

表 4.1-28 铜钨整体电触头的导电铜及铜合金的化学成分与物理性能

材料名称	化学符号	化学成分（%）			物理机械性能				
		Cu ≥	杂质总和 ≤	添加物 ≤	密度 (g/cm³) ≥	硬度 HB≥		电阻率 (μΩ·cm)	抗拉强度 (MPa)
						硬态	半硬态		
铜	Cu	99.5	0.5	—	8.80	78	60	1.85	196
铜合金	—	余量	0.5	1.2	8.70	110	70	2.10	250

注 1. 表中铜合金添加物主要为 Cr、Zr、Cd 等。
2. 硬度值“硬态”，表示该电触头产品压力加工后未经退火处理或经强化处理。
3. 软态产品的硬度、抗拉强度由供需双方协商确定。

铬是降低铜电导率较少的元素，它与铜形成的固溶体，其溶解度随温度的降低而急剧减少，图 4.1-40 为 Cu—Cr 系相图。因此用固溶时效硬化处理可提高其硬度和抗拉强度，经时效沉淀后的固溶体中保留的溶质原子将减少，因而可获得高的导电性和良好的机械性能，见表4.1-29，这就是选择铬青铜作为导电端材料的原因。

表 4.1-29 铬青铜 QCr0.5 的化学成分、物理、机械性能

材料	化学成分(%)				状态	抗拉强度 (MN/m^2)	延伸率 (%)	布氏硬度 HB	导电度 IACS (%)
	Cr	Pb	P	Cu					
QCr0.5	0.5～1.0			余	软态	23	30	50～70	80～85
					硬态①	48	11	130 150	
	0.55～1.3	<0.015	<0.04	余	固溶时效	>35	>10	>100	≥80

注 表示此行数据系我国 90 年代引进日本三菱公司 SF_6 系列断路器制造技术时提供的对导电端的技术要求。

① 表示加工率为 50%。

4.5.2 触头元件的制造方法

制取整体触头的方法（即 CuW 触头与 Cu 或 CrCu 导电杆的连接方法）有多种，目前主要有钎焊、电子束焊、整体式烧结熔渗法（或称溶铸法）、摩擦焊、储能闪光焊和扩散焊接等方法。

（1）钎焊。将制成的铜钨电触头与 CrCu/Cu 导电体在连接界面处用钎焊料焊接成一体。焊接前应去除焊接表面的油脂和氧化物，保证焊接面十分清洁。钎焊可采用在空气中的烧焊、在保护气氛下的感应焊或炉内铜钎焊。为了保证钎焊的质量和减少钎焊对整体电触头电阻的影响，生产厂家开发了一系列的钎焊料。加热时，进行钎焊的过程要快，使焊

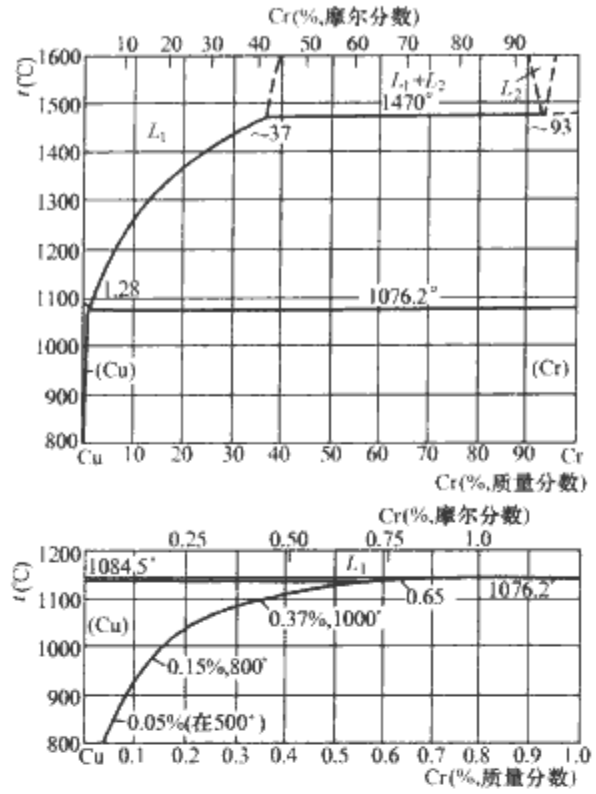


图 4.1-40 Cu—Cr 系相图

接处置于高温停留的时间最短，以避免导电体硬度值降低而失去刚性。焊接后待钎料凝固后，应立即将导电体的底部浸入水中冷却，避免焊接热影响区扩大。钎焊法的优点是：可以钎焊具有一定硬度的铜合金，通过热处理就可得到具有相当强度的导电体。其缺点是：CuW 触头与 CrCu/Cu 之间有明显的焊缝，焊缝难免有缺陷，诸如气孔、夹杂物等，由此会降低焊接强度；由于焊接过程的热影响，使界面附近 CrCu/Cu 处于退火状态，强度及弹性降低，也使整体电触头的电阻增高。

（2）整体式烧结熔渗。在熔渗时采用过量的铜在模型中进行烧结熔渗＋熔铸，即铜在熔渗后，过量的部分在模型中熔铸成相应的形状，并与熔渗的触头部分连成一体，随后再对 CrCu/Cu 端进行强化处理，以提高它们的硬度和抗拉强度。这种方法可允许结合的界面是任意形状，但不适合于管状的导电端。目前国内大多厂家采用这种方法生产整体触头元件，但各家的生产工艺也有差别：有预先制成 W 骨架再在连续烧结炉内或是在真空下或在氮气氛下进行烧结；有采用立式烧结炉，先在氢气保护下进行熔渗获得 CuW 触头，随后在同一炉内充氮气进行触头与 CrCu/Cu 的熔接。采用这种方法的厂家认为：这种方法可避免卧式烧结炉在整体熔渗时，CrCu 熔化后，Cr 向 CuW 中的 Cu 扩散，造成 CrCu 导电端的弹性不均匀而引起触指与静触头之间结合力不稳定，导致弧触头的烧损不均。但这种方法是周期式生产，不能连续生产。此外，还有一种整个过程是属于液相烧结式的熔铸法，这种方法可连续生产，生产效率高，比较适用于生产小批量主触头或尺寸较小、开断小电流的接地开关、隔离开关等触头元件。

（3）电子束焊。将铜钨电触头与 CrCu/Cu 导电材料装于专用夹具，用电子束焊接机进行焊接。电子束焊接的基本原理是利用阴极产生的电子束流在强大磁场的作用下，以极高的速度轰击焊接表面，将动能转化为热能，以熔化焊层，从而形成牢固的焊接面，它与其他焊接方法相比有以下优点：

1）能量高度集中，因而可得到深而窄的焊缝，用于焊接触头的深宽比可达 10∶1～20∶1；甚至 40∶1，视不同机种而定。

2）因能量高度集中，在较短的时间内即可使焊缝处的材料熔化，热影响区小，CrCu 材料不退火，而且避免了 CrCu 第二次烧结产生 Cr 偏析，从而保持了 CrCu 焊接前的机械性能。

3）焊接强度高，可达到抗拉强度大于或等于 220N/mm²。

4）整个焊接过程是在真空室中进行，避免了焊接的氧化或污染。

5）与钎焊相比，不需焊条和焊剂，焊缝处清洁，成品率高。

6）使用连续烧结炉受到产品尺寸的限制，而用电子束焊机，触头的外径及长度可在很大的范围内变化。

表 4.1-30 为 CuW70/CrCu 电子束焊接性能。

表 4.1-30　　CuW70/CrCu 电子束焊接性能

材　料	性　能			
	焊缝抗拉强度 (N/mm²)	CrCu 硬度/(N/mm²)		
CuW70/CrCu	230～260	距 CuW 界面 5mm	距 CuW 界面 10mm	距 CuW 界面 17mm
		1000～1200	1050～1270	1078～1280

（4）摩擦焊。摩擦焊是一种高效的固态焊接方法，即通过机械摩擦与施加载荷，使两个焊接表面之间产生热量并呈半固熔状态而互相连接。这种焊接的质量和锻造连接类似，焊接时结合面不熔化，不需要填充金属、焊剂和保护气体。它具有焊接过程简单、清洁、无烟雾和焊渣、节约材料和能源的优点，也没有液相凝固产生缩孔、偏析或加入钎焊料使整体触头的电阻增高的缺陷。同时生产效率和成品率较高，生产过程环保。与电子束焊一样，这种方法需要购置专用设备而使成本提高，因此不适合于单件生产，但较适合于生产批量较大的回转体、较长导电杆和管类的元件。目前国内有 1～2 家铜钨电触头材料生产厂采用这种方法。

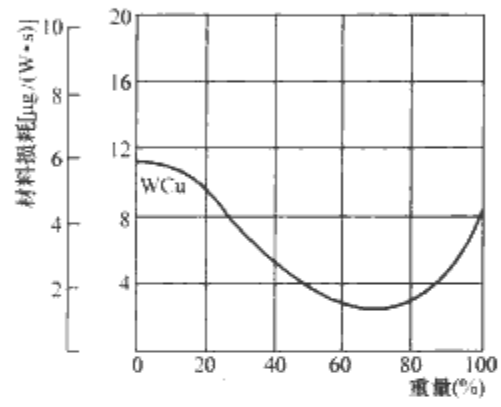
制取整体电触头的各种方法各有特点，一般来说，应根据触头元件的支承体材质、结合强度要求、触头的形状、尺寸、批量大小等具体情况来选择不同的方法。ABB 公司选用的 CuW 整体触头元件是用电子束焊、闪光焊（火花对接焊）及熔铸焊 3 种方法；韩国的高压电器触头元件多用钎焊法；俄罗斯则用电子束焊，很成功；而生产 CuW 电触头材料的著名公司 Elektro-Metall Plansee 则可提供在空气中进行焊枪烧焊、保护气氛下的感应钎焊和炉内硬钎焊、熔铸焊及电子束焊（用于连接硬度和抗拉强度很高的触头支撑体，如 CrCu 或铝合金）的工艺装备。

4.6　CuW 触头材料的应用

CuW 触头的生产与应用已有 80 多年的发展史，最开始应用于油开关。20 世纪 50 年代后用于充气开关、小容量真空开关。随着触头结构设计和灭弧介质的改进，已在 SF_6 高压断路器等开关应用多年。目前除 CuW90 用于真空负荷开关外，主要用于 SF_6 高压断路器、组合电器、隔离开关。不同成分的触头材料有其较佳的适用场合，一般来说，在 SF_6 断路器中以 Cu20/W80 或 Cu30/W70、在空气断路器以 Cu10/W90、在油断路器中以 Cu15/W85 或 Cu20/W80 的组成最具有抗电弧烧损能力。

周围介质和开关结构对铜钨触头电腐蚀性能影响极大。在小电流下，装在 SF_6 开关中的铜钨触头，其电腐蚀量比在空气中小 2.5 倍；大电流时则相差许多倍；如果再加入外磁场，使电流分散，则电腐蚀要小 50 多倍。

研究发现，含钨 60%～80%（质量分数）的铜钨熔渗材料甚至比纯钨有更大的抗电弧腐蚀性能。图 4.1-41 显示了 CuW 的烧损率与 W 含量的关系，图 4.1-42 则是 CuW 触头烧损率与 Cu 含量的关系。不同的试验条件都说明，含钨 60%～80% 的铜钨触头有较好的抗电弧烧损能力，故 CuW60 至 CuW80 范围内各组成的触头都有较大的实用价值。用作高压 SF_6 断路器（GCB）和气体绝缘金属封闭组合电器（GIS）的弧触头大多为 CuW70～CuW80。而用于高压有载分接开关或变压器分级开关的多为 CuW65 或 CuW65Ni 触头。焊接这类触头的焊料一般是银铜，触头座为纯铁。CuW50 原用于油断路器，现在这种断路器已逐步被淘汰。CuW90 多用于做电容器加工设备的耐烧电极等。一般说来，作为弧触头不同组分的 CuW 触头有对应的电压等级（额定电压与额定电流等级），见表 4.1-31。但各开关厂生产的开关，因应用场合、触头结构及使用经验等的不同，不同组分的 CuW 触头的应用也不完全对应着这种关系。



W—含量（%）重量

图 4.1-41　CuW 的烧损率与 W 含量的关系
（此关系根据电容器放电 10kV、110kA 得出）

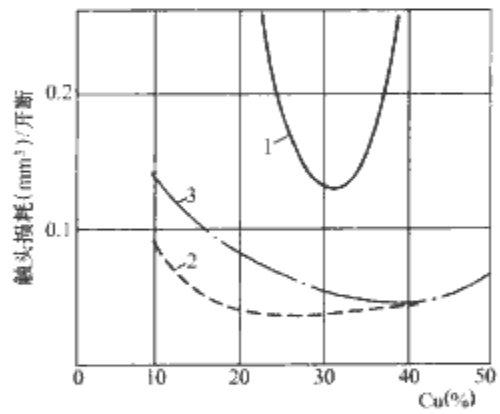


图 4.1-42　CuW 触头烧损率与 Cu 含量的关系
1—空气中试验，400A，176V，$\cos\varphi=0.98$；
2—空气中试验，800A，176V，$\cos\varphi=0.30$；
3—在油中试验，800A，176V，$\cos\varphi=0.30$

表 4.1-31　　弧触头 CuW 材料的应用

牌　号	额定电压(kV)	额定电流(A)	极限开断电流(kA)
CuW60	252～800	2500～4000	40/50,50/63,63
CuW70	40.5	1600～2000	16/25/31.5
	72.5、126、550	1250～4000	31.5/40/50
CuW75	252、330、550	2000～4000	40/50,50/63
CuW80	12～40.5	400～2000	6.3～20/31，16/25/31.5
	72.5、126、252、550、800	2500～4000	31.5,31.5/40/50 50/63

4.7 国外中高压电触头材料的发展动态

国际上生产铜钨触头的著名公司主要有德国 DODUCO、Louis Renner GmbH、奥地利 Metallwerk Plansee GmbH；日本的钨公司；英国 JMM 公司；美国 Gibson 及 Advanced 冶金有限公司；印度 MODISON 公司等。表 4.1-32～表 4.1-36 列示了它们生产的主要铜钨触头材料品种与性能。

表 4.1-32 AMI DODUCO 公司触头材料及其性能

品 牌	密 度 (g/m^3)	硬 度 (HV10)	电导率 [$m/(\Omega \cdot mm^2)$]	热传导率 [$W/(m \cdot K)$]
CUWODUR 60	12.9～13.3	140～170	21～35	170
CUWODUR 70	14.0～14.4	160～200	19～23	145
CUWODUR 75	14.7～15.1	180～220	18～22	135
CUWODUR 80	15.3～15.7	210～250	16～20	130

表 4.1-33 德国 Louis Renner 公司弧触头材料及其性能

品 牌	粉末粒度 (μm)	Cu 含量 (%)	硬度 HV10	应 用
Renet K 20 N	颗粒度 0～140 FSSS 值 20～25	20±3	170～230	标准型高压断路器
Renet K 20 G (CuW80/20 G)	颗粒度 0～140 平均值 75	20±3	170～230	
Renet K 20 A	颗粒度 0～140 FSSS 值 40～70	20+0～4	170～230	
Renet K 40 C	颗粒度 0～140 FSSS 值 10～15	40±3	130～170	承受负荷较小的触头部件
Renet K 20 CD	颗粒度 0～140 FSSS 值 10～15	20±3	180～240	开断短路电流大，耐电弧烧蚀的触头部件

注 FSSS 值为费氏标准测定粒度值。

表 4.1-34 Metallwerk Plansee 公司触头材料及其性能（在 20℃）

牌 号	材料组成	密 度 (g/m^3)	电导率 (%)IACS	热传导率 [W/(m·℃)]	线膨胀系数 (m/m℃) (20～400℃)	硬度 HB10	弹性模量 (kN/mm^2)	抗拉强度 (N/mm^2)
K10	10±1% Cu 90±1% W	17.3	35	162	6.1×10^{-6}	280	300	580
K20	20±2% Cu 80±2% W	15.4	35	134		180	225	440
K20N	20±2% Cu 80±2% W	15.4	25	140	8.8×10^{-6}	210	235	500
A 20NiF	20±2% Cu 80±2% W	15.2	32			HV30≥210		
K25	25±2% Cu 75±2% W	14.6	36	138			225	390
A25NiF	25±2% Cu 75±2% W	15.5	36			HV30≥196		
K30H	30±3% Cu 70±3% W	14.2	43	147			230	440
K33S	33±3% Cu 67±3% W	14.0	47	200	11.5×10^{-6}		218	440
K40	40±3% Cu 60±3% W	13.0	51			140	180	290
K50	50±3% Cu 50±3% W	12.0	58			120	150	250

表 4.1-35 日本钨公司触头材料及其性能

牌 号	主要成分 Cu—W (%)	物理性能		
		密度(g/m^3)	硬度 HRB 硬态	电导率(%)IACS
C20A 2	20 80	15.6	99	40
C30A 1	30 70	14.2	90	42
C40A 1	40 60	13.2	88	50
C30A 2	30 70	14.2	91	45
C40A 2	40 60	13.21	86	53
C50A 1	50 50	12.0	78	55
C70A 1	70 30	10.8	66	73
C10E 2	10 90	17.0	105	32
C20E 2	20 80	15.6	102	38
C30F 2	30 70	13.8	92	43
C30H 2	30 70	13.5	92	45

表 4.1-36 美国 Gibson 公司触头材料品种及其性能

成分含量 (%)	密度 (g/m^3)	硬度(HRB)	电导率 (%)IACS
Cu75W25	9.5	52～59	76
Cu50W50	11.8	73～81	60
Cu40W60	12.7	78～86	54
Cu30W70	13.9	86～96	48
Cu25W75	14.3	90～100	45
Cu20W80	15.2	95～105	40
Cu50W50	11.1	90～100	41

注 成分含量指质量分数。

1995 年，ABB 公司为我国三峡工程提供的 SF_6 断路器中开断大短路电流、抗耐电弧烧损的弧触头使用的是 DODUCO 公司生产的昂贵的 CuW75 H 型触头，其硬度 HV 10 为 180～230，Cu 含量误差均为±3%，粉末粒度在

0～60μm，FSSS 值为 10～15μm 范围；还有德国 Louis Renner 公司的 Renet K 20 CD 型触头以及 Metallwerk Plansee 公司的 A20 NiF 型触头。

触头材料包括整体触头元件是中高压电器的核心部件，国内外中高压电器都用钨基材料的铜钨电触头，尚未有第二种基体材料可替代它。但各制造商在铜钨中添加元素的种类和数量、制备方法（特别是粉末的性能、粒度大小及其分布的选择）、CuW 触头与导电端的连接方法以及工装条件等则有较大的差异，正是这些技术的差异构成了产品性能及稳定性的不同。

尽管业界均确认粉末冶金方法制备的 CuW 触头能够满足中高压电器的使用要求，但改进 CuW 触头性能的研究工作一直在进行，不过，至今并未有重大突破。随着输变电技术的发展，为满足特高压、大输送容量、高可靠性的高压电器要求，近几年来，各国触头材料制造商和研究机构做了以下几方面工作：

（1）CuW 触头成分的改进。如日本“W 合金”专利报道在 CuW 中添加 Ti、Zr、Cr、Mo 及 W 和 La 的硼化物，以改善 CuW 触头的高温电性能和热稳定性，降低电损耗；俄罗斯专利“断路器用 CuW 触头的制备方法”报道，通过添加 Ni、Co、Ag、Zr、Ti 来改善烧结特性，提高粉末和界面的粘结能力，改善触头材料的高温硬度、导电性及组织稳定性；2002 年，美国学者 Dorfman 认为将 Ni 作为活化烧结剂加入 Cu 与 W 的混合粉末中，可能会形成脆性的 CuNi 中间相，影响合金强度，进而提出用 W 包覆 Cu 复合粉末后再与 Ni 粉混合压制烧结制备 Cu—W—Ni 触头可克服此缺陷；而我国则有单位在研究添加少量 Cr 对 CuW 触头性能的影响。

（2）制备方法的优化。除开展 CuW 触头具体制造工艺，如烧结时的升温速度、烧结温度和时间，熔渗温度与时间，W 粉颗粒度及分布等的研究外，韩国和日本在开展用纳米 Cu-W 粉末制备 CuW 触头的研究，并初步认为将纳米技术应用于 CuW 的制备，有利于提高烧结性能和耐电弧烧损性能。我国也有单位在开展纳米钨铜粉末制造铜钨材料的试验工作和开展用雾化法制备 CuW 合金粉末的研究。

（3）提高铬青铜高温强度的研究，包括铬含量对强度的影响，开发新型高强度高导电性能铜合金的研究等。

总之，CuW 触头材料经过 80 多年的研究应用和不断的改进与完善，已成为应用广泛、相对成熟的触头材料系列。目前国内外开展研究的内容仍属改进完善范畴。在可预见的未来，CuW 触头也将是超高压、特高压电器首选的材料。

5　真空开关用触头材料

5.1　真空开关触头材料的工作环境与要求

在真空开关装置中，为了保持由玻璃或陶瓷制成的绝缘外壳内的高真空度，外壳内除必要的动、静触头外，不可能再配置结构复杂的灭弧装置。真空开关中的介质几乎是在强电弧作用下触头材料产生的金属蒸气所决定的，即电触头材料为电弧提供导电媒介，这意味着开关的特性在很大的程度上是由所采用的触头材料及触头结构所决定。这与一般断路器的触头只用来承载和开、合电流，而电弧的熄灭则另由专门的灭弧装置来完成是不同的。因此，真空触头系统被称为“真空灭弧室的心脏”，触头材料及其几何形状是影响真空开关开断容量、耐压、抗熔焊及电寿命等主要技术参数的重要因素。换言之，真空开关装置中的电弧特性非常依赖所使用的触头材料的性能，所以对不同应用场合的真空开关装置选择适合的触头材料是至关重要的。

真空开关使用的触头必须满足许多不同的要求，不同类型的真空开关装置（如中压断路器、低压真空接触器、真空负荷开关等）对这些要求的水平也不同，某些要求在一定范围内彼此还相互矛盾。在许多重要的要求中，下列几点是必须满足的：

（1）电介质强度。触头打开时，触头间隙的电介质强度（静态击穿电压）。如工作电压等级为 7.2kV 时，介电强度应达到 60kV；而工作电压等级为 36kV 时，介电强度则为 170kV。

（2）开断电流能力。随着电网容量的增加及真空断路器的应用范围扩大，切断大电流的要求不断被提出。目前要求触头材料应能满足 10kV、80kA 的开断能力，而且要求在长时间内稳定，这就需要在分断时触头产生适量的等离子体，即在触头间隙中过量的电荷不应对短路电流的分断能力有不利的影响；但当电流接近自然过零时又必须提供足够的电荷导通，以保持有最小的截流值。

（3）使用寿命。对于真空接触器，操作次数要求大于或等于 1 000 000；对于真空断路器，在额定电流下的操作次数要求大于或等于 10 000。而在高达 80kA 的短路电流下，至少要分合 30 次，这是开关遇到的最严重的情况。

（4）截流水平。在开断交流电时，触头分开后电弧应持续到电流自然过零为止，若电流在达到零点前就被迫熄灭电弧而产生一个过电压，则这一临界等级的电流就被称为截流值。与其他类型的开关一样，真空开关在开断小电流时也会出现截流现象，尤其是开断感性电流时，所有电弧需要某一定最小等级的电流供给能量才能维持。截流值要尽可能地小，其最大允许值取决于开关应用场合，截流值过大，会引起瞬时很高的过电压，这可能造成电器装置的损坏。所以，除了采用如 R-C 保护装置或氧化锌避雷器作为真空开关的过电压保护外，采用低截流的触头材料来解决过电压的产生是最重要的措施，在操动真空接触器时尤其要考虑这一要求，应尽量选用截流值很低的触头材料。

（5）导电、电热性。导电、导热性要良好。在额定电流 4～12kA 下，触头温升应小于 65K。

（6）抗熔焊性。触头熔焊强度必须超过装置驱动打开触头的力。真空开关触头一般都不设计为多触指并联结构，而设计成对接式整块结构。这种对接式触头不能补偿短路电流下动静触头间的巨大斥力，因而需要的外加接触力比玫瑰式触头要大得多。另外，动静触头间面对面地撞击，极易产生弹跳分离引燃电弧，加之触头又处于高真空中，没有氧化和污染问题，所以触头在关合、通过大短路电流时极易熔焊。解决真空开关触头的弹跳与熔焊问题，除开关设计中应考虑加大触头的预压力、减少触头的质量等外，还要选用抗熔焊性能好的触头材料。

（7）气体平衡。真空灭弧室内的真空度必须在 1.33×10^{-2} Pa～1.33×10^{-5} Pa 的高真空范畴，才能确保电子的“平均自由行程”大于电位击穿行程，达到高的介质强度。换言之，电子可以自由通过灭弧室中高电压之间的间隙，不会因与这些为数极少的气体分子相碰撞而导致介质击穿，这就要求真空灭弧室内的压力在装置的寿命期内不恶化：在开断过程，短时的压力升高不应接近击穿电压巴申（Paschen）最小值；触头材料的含气量应特别低或具有强的吸气能力（含气量主要指含氧量），否则在切断电流时，触头之间将产生很高的温度，如果放出大量气体，灭弧室里真空度下降，将严重影响介质强度。对铜合金系触头材料（如 CuBi、CuTeSe 等）要求较低的含气量，一般认为应在几十 10^{-6} 以

下，而 CuCr 触头中的含气量则可高达几百 ppm 甚至 1 千多 ppm，其开断和耐压方面仍有良好的性能。美国著名电接触教授 Paul G. Slade 认为 CuCr 材料的氧含量在 2000×10^{-6} 以内，也是能满足触头操作寿命要求的。这是由于 Cr 具有强烈的吸氧作用所至。实践证明，在真空灭弧室的有效容积一定的情况下，根据开断电流的大小，真空断路器触头材料选用时的一个重要考虑因素是选用非常容易脱气（如铜、银、钨等金属）或与气体成分具有极高的亲和力（如铬）而不产生明显放气的触头材料。除氧之外，一般认为真空灭弧室内的其他气体元素越低越好，且需要控制的是氮与氢。目前，国内 CuCr 触头含氮量要求在 50×10^{-6} 以下。真空灭弧室内的氮主要来源于金属 Cr 块及随后机械破碎成 Cr 粉的原材料中，若用电解铜粉作触头材料，可能会带进 30×10^{-6} 左右的氮含量。而氢含量一般都较低，要求在 5×10^{-6} 以下，其主要来源于电解 Cr 粉及随后的还原处理。

触头电性能的各种要求以不同的方式依赖于触头材料的一系列物理性能，如：电导率和导热率、抗拉强度、熔化和凝固特性、组分的蒸汽压、气体平衡、显微组织及电子发射特性等等。触头电性能与材料性能之间有着复杂而密切的内在关系，图 4.1-43 列出了它们之间的相应关系。这个关系图可为选择真空触头材料提供指南。但因为触头电性能与材料性能之间的相互复杂影响，何况还有若干触头电性能对材料的某些物理性能的要求相互矛盾，例如：好的分断特性要求材料的热导率高，蒸汽压低；低的截流值却希望材料热导率低，蒸汽压高；耐高电压要求材料具有较高的硬度，而低温升对材料硬度的要求则相反等，所以一种材料很难同时满足所有触头性能的要求。此外，除这些性能要求外，在选择适应某种应用场合的触头材料时，还必须考虑材料的加工性、焊接性及经济性等因素。

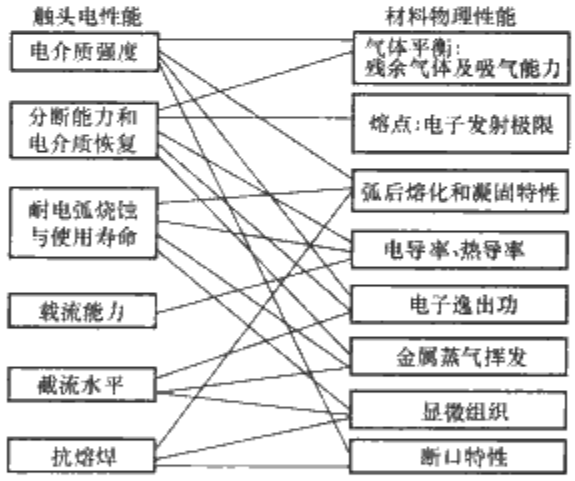


图 4.1-43 触头电性能与材料物理性能的关系

为研究触头电性能与材料之间的关系，国内外许多研究部门建立了模拟开关试验装置进行试验，获得了在真空开关条件下触头材料特性的大量有价值的信息。但必须指出：为决定在某一应用场合下最合适的触头材料，最终的试验还是要在实际的开关装置中进行。这是因为一系列的设计参数，包括触头形状与结构（如平板触头、横向磁场触头、纵向磁场触头等）、接触压力、磁场分布、屏蔽结构等都对触头材料在灭弧室内的行为产生很强的影响。所以触头材料的供应商与灭弧室、开关装置的制造者之间的紧密合作是成功开发触头材料和开关装置的先决条件。

我国真空断路器在 12～40.5kV 电压等级的中压电器中已占据绝对优势，产品量大面广，品种繁多，系列齐全，这也反映了目前我国真空开关触头材料的发展水平。长期以来，我国真空断路器的发展一直受到有关的研究、制造和运行部门的普遍关注，纵观真空开关开断容量的提高过程，实质上也是触头材料及触头结构改进的发展过程。

5.2 真空开关触头材料的种类及其性能

在真空开关的发展历史进程中，相关人员曾研究过大量的有可能使用的触头材料。研究初期，真空开关几乎全部采用钨（W）、钼（Mo）等难熔金属作触头材料，钨、钼虽具有良好的耐弧性能，燃弧时烧损率小，抗熔焊能力强，真空性能也相当好，但在熔点温度下具有很强的热发射电子的能力，会严重地影响弧柱区介质强度的恢复，使开断性能恶化，此外，其截流值也很大（约 10A），用它们作真空开关触头材料，其开断电流只能达到 3～4kA；而导电性良好的材料，如铜（Cu）、银（Ag）等金属，虽在相同条件下，铜比钨触头的开断能力大 2 倍以上，但其耐电弧烧损能力不如钨，而且由于抗熔焊性能不好致使其也难在真空开关中使用。这两类材料的电性能比较见表 4.1-37。

表 4.1-37 两类材料的电性能比较

电 性 能	难熔金属材料	良导电性材料
抗熔焊性	好	差
耐弧性能	好	差
截流值	大	小
开断性能	差	好
大电流开断后介质强度的恢复性能	差	好
真空性	好	差
加工性	差	好

研究与实践证明，真空开关对触头材料的复杂要求只能用多元多相材料来满足。至今只有 CuBi、CuCr 、WCu 和 AgWC 4 组材料有显著的实际用途，过去多数使用 CuBi 的场合今日已由 CuCr 代替了。目前，断路器用触头材料普遍使用 CuCr 系列触头材料，而真空负荷开关和真空接触器则以使用 WCu 系列和 AgWC 触头材料为主。

5.2.1 真空断路器用触头材料

5.2.1.1 铜合金系触头材料

20 世纪 60 年代，半导体和冶金技术的迅速发展为触头材料提供了制备含气量低于 1×10^{-6} 的金属材料，使真空开关触头材料的研制进入一个新的发展阶段。在铜中添加适量的低熔点、高蒸汽压元素，如铋（Bi，熔点为 271.2℃）、碲（Te，熔点为 450℃）、铅（Pb，熔点为 327.3℃）等组成有限固溶的二元合金，如 CuBi 合金（Bi 含量为 0.5%～1.0%）、CuTe、CuPb 合金等。由于合金主元素 Cu 的熔点不高，不容易发射热电子，故有良好的开断能力和抗熔焊能力，曾被成功地用作真空断路器触头材料。为改善 CuBi 合金，在合金中再添加低熔点元素如 Te、硒（Se，熔点为 220℃）、铝（Al，熔点为 660.1℃）或中熔点元素如铈（Ce，熔点为 804℃）、银（Ag，熔点为 960.8℃）等组成 CuTeSe（Te 含量为 3%～4%，Se 含量为 0.5%～1.0%）、CuBiAl、CuBiCe 及 CuBiAg 等三元合金。这些合金既保存了铜的高导电性、导热性，连续通电流能力，又因为 Bi、Te 等低熔点金属在主成分 Cu 的晶界上析出一种呈不连续的沉积物，产生一种机械强度薄弱的层面，在分断时很容易被拉断，而使合金具有很好的抗熔焊性。还由于 CuBi 合金在燃弧时蒸发大量的 Bi 蒸汽，使 CuBi 合金触头间的电弧稳定性比难熔金属 W、Mo 高得多，而有小得多的截流值。然而这类合金的蒸汽压高，却容易造成：

（1）电流过零后，电压恢复速度太快容易引起击穿。

（2）耐电弧烧蚀性能差，满容量分断后触头烧蚀严重，表面不平整，影响触头寿命。

（3）使冲击耐压降低。

（4）铜与铋的熔点及蒸汽压相差较大（在 1.3310^{-2}Pa 下铜的蒸发温度为 1034℃，铋为 536℃），在电弧作用后，它们的蒸发数量不同会造成触头表面不均匀的磨损并使开断能力下降。

（5）材料成分比例发生变化，使它们失去了原有的低截流特性。

这类触头材料用真空冶炼方法制备，工艺简单，成本较低，可获得很低的气体含量（$\leqslant 10\times10^{-6}$）。某些铜合金触头材料的静态物理性能见表 4.1-38，它们在真空开关发展历史中曾满足 10kV，300MVA 真空断路器的要求，不过，现在已很少使用了。

表 4.1-38　　铜合金触头材料的物理性能

合金名称	化学成分（质量分数）（%）	密　度（kg/cm³）	电阻率（μΩ·cm）	硬度 HB（10MPa）
CuBiCe	Bi 为 0.6 Ce 为 0.06 余 Cu	≥8.9	≤1.7	≥44
CuBiAg①	Bi 为 0.5～0.8 Ag 为 2.2～2.6 余 Cu	≥8.9	≤2.0	≥45
CuTeSe	Te 为 3.2～3.4 Se 为 1.2～1.3 余 Cu	≥8.7	≤2.4	≥53
CuTeSeAg	Te 为 3.2～3.4 Se 为 0.7～0.8 Ag 为 2.1～2.3 余 Cu	≥8.7	≤1.9	≥53

① 10kV，300MVA 真空断路器触头材料行标技术条件。

5.2.1.2　铜铬系触头材料

20 世纪 70 年代初铜铬（CuCr）作为一种新型触头材料与当时广泛采用的 CuBi 合金相竞争。自此，对铜铬材料特性、制备工艺以及在中压范围内运行的大量研究，证实了这种材料能够很好地满足中压大电流真空开关的要求。由于制造出高质量的 CuCr 触头比较困难，直到 1980 年后，真空灭弧室采用 CuCr 材料才逐渐增多。CuCr 触头材料的实际应用，使得小尺寸、高开断电流能力的真空灭弧室得以不断地向前发展。图 4.1-44 示出了具有纵磁场的 CuCr 触头在 12kV 下的开断能力，从图中可以看到，直径为 80mm 的触头可开断 50kV（有效值）的短路电流。随着触头材料与灭弧室制造工艺的改进，还可获得拥有更大开断能力的更小直径的触头。到目前为止，铜铬已被认为是综合性能最为优异的真空开关用触头材料而被广泛地使用，它对真空开关能在中压等级电器中迅速应用起着重要的作用。

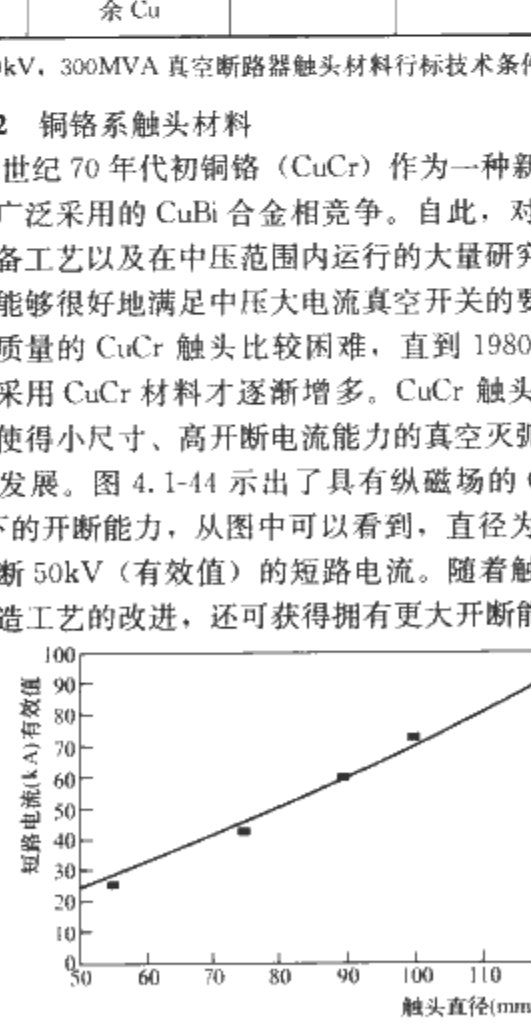


图 4.1-44　CuCr 纵磁场触头开断电流能力与触头直径的关系

（1）铜铬材料与铜＋低熔点类合金性能对比。与 CuTeSe 合金相比，CuCr 材料的分断能力约高出 10%，特别是在高压大电流情况下，CuCr 是极好的材料。图 4.1-45 曲线表明，CuCr 既适用于高电压，也适用于大电流，而 CuBi 和 CuTeSe 则适用于中压大电流。此外，CuCr 具有更高的耐电压强度、更低的电弧烧损率和弧后重燃概率。图 4.1-46 对比了 CuCr、CuBi、CuTeSe 触头操作电容器时的重击穿几率，对比结果表明 CuCr 材料的优越性是很明显的。虽然 CuCr 的抗熔焊性能不如 CuBi 系合金，但足够高的 Cr 含量可保证材料有足够的抗熔焊性。表 4.1-39 概括了 CuCr 与 CuBi 系合金的综合性能的对比。显然，采用 CuCr 材料做真空断路器触头有着更多的优越性。

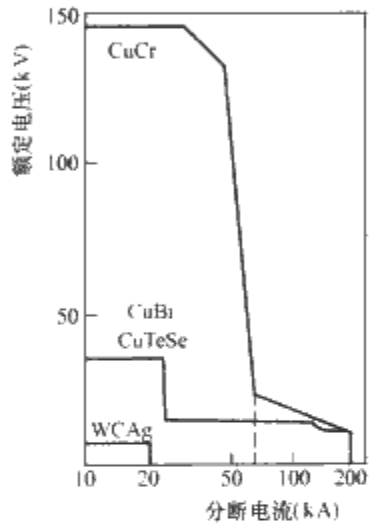


图 4.1-45　纵磁场触头结构 CuCr、CuBi 及 CuTeSe 的运行性能对比

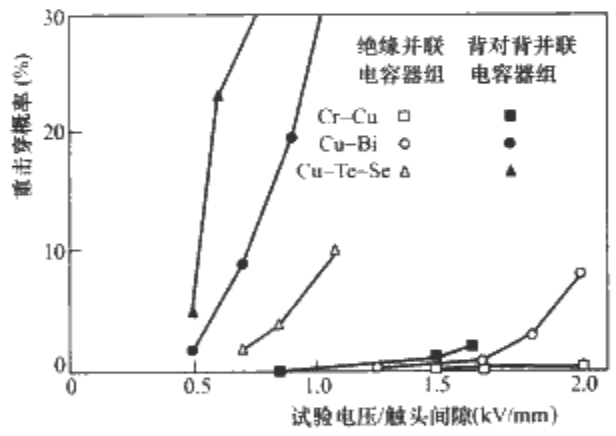


图 4.1-46　CuCr、CuBi、CuTeSe 触头重击穿比较

表 4.1-39　　铜铬触头材料与铜铋系合金特性比较

特　性	铜铋系合金	铜　铬
连续通电流能力	＋	0
吸气能力	－	＋
抗熔焊性	＋	0
耐电弧烧蚀能力	－	＋
截流大小	－	0
短路电流分断能力	0	＋
介质强度	－	＋
制造费用	＋	0

注　表中符号＋为佳；－为不佳；0 为尚可。

(2) 铜铬触头材料优越特性分析。铜铬合金之所以有上述那些好的特性，是因为：

1) 铜铬实际上是两相结构的假合金，元素彼此相间存在。从 1988 年 西门子公司 R. Müller 确定的新 CuCr 系相图(图 4.1-47)可以得知，Cr 在 Cu 中的固溶度很小(最大固溶度仅为 0.65%)，在共晶温度下(1076℃)约有 1.28% 的 Cr 溶于 Cu，500℃以下则几乎不溶。这种结构的特点一方面使 Cu、Cr 都充分保持了各自的良好特性：具有略低的熔点、高电导率和热导率的 Cu 组分，有利于提高真空开关的分断能力；另一方面具有较高熔点和机械强度的 Cr 组分则保证了真空开关良好的耐电压、抗烧蚀、抗熔焊和较低的截流特性。组成 CuCr50 合金的电导率和热导率乃有纯铜的 30% [纯铜的电导率为 60S/m，热导率为 4W/(cm · K)，而 CuCr50 的电导率在 17S/m～20S/m]，在额定电流下触头不会发生过热。含 Cr 更少的 CuCr 触头材料，如 CuCr25 有更好的电导率(Cr 粉筛分粒度在 0～36μm 时为 29.0S/m；Cr 粉筛分粒度在 36～75μm 时为 28.9S/m)和热导率。

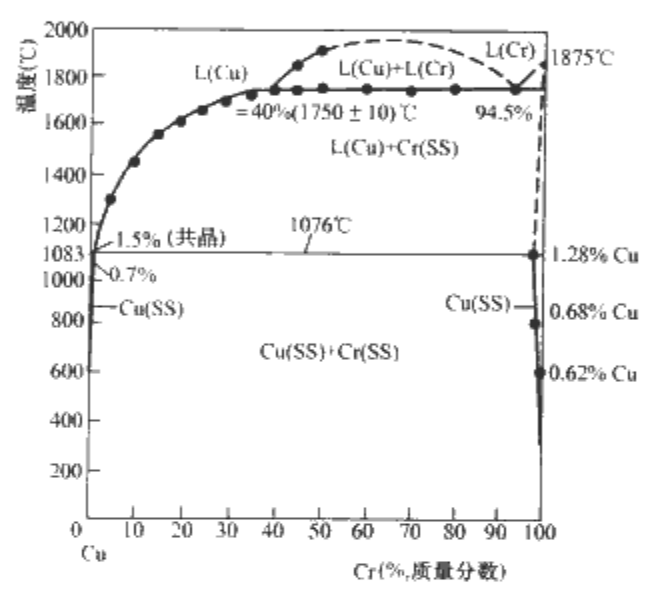


图 4.1-47 CuCr 系相图

2) 铜铬作为真空开关触头材料的一个显著的优点，是铬组分对氧气有很强的亲和力。每次分断循环操作过程产生含铬的蒸发膜具有吸气作用，它能吸收 CH_4、Co、N_2 和 H_2 等气体。图 4.1-48 表示 CuCr 触头材料在一系列开关操作后，气体压力减少约半个数量级，这说明在真空中即使分断大电流，CuCr 合金的吸气效应也比气体释放过程更为有效。剩余气体主要由氢及甲烷组成，有少量的一氧化碳和氮。这一现象比起材料本身含气量多少更为重要，因为它确保了灭弧室使用期内有一个恒定的真空度，大约在 10^{-4}Pa，这是灭弧室工作寿命长的重要保证。根据此特性，就允许 CuCr 可有几百 ppm ($\times10^{-6}$) 甚至更高的氧含量，而无须像 Cu-Bi 合金对气体含量那么高的要求。因而可以采用工艺上可行而较经济的制造方法。

3) 铜与铬的蒸汽压力在 1800～2600K 的温度范围内都是相同的。当电弧作用时它们熔化，并以大约相等的数量蒸发。由于燃弧期间触头材料损失大多是蒸发侵蚀，这就意味着触头表面的材料成分能保持不变，因而当开关经大量操作次数以后，触头的性能实际上也能保持不变，首先是保持着开断能力。

4) 在液态下，铬的溶解度随着温度的升高而明显增大见图 4.1-47。因此，开关电弧能在 CuCr 触头表面产生均匀的熔化，并表现出特别好的熔化和凝固特性：熔化在很大的温度范围内被熔点更高的 Cr 粒子稳定住，由于群星分布的 Cr 粒子作用，以及 CuCr 的体积热导率较低，产生了浅平状的熔池(约高 150μm，而 Cu 的熔池为 1mm 高)，凝固得非常快。这种机理作用一方面使 Cr 冷却和固化后的形态是细而弥散的粒子，同时避免了高温斑点和大液滴的形成，因而触头间隙电介质强度恢复极快，即使开断很大的短路电流，也能获得很好的熄弧能力。另一方面，凝固后的触头表面是光滑的，没有尖峰或沟槽，使 CuCr 触头维持在高介质强度和耐电压强度状态。

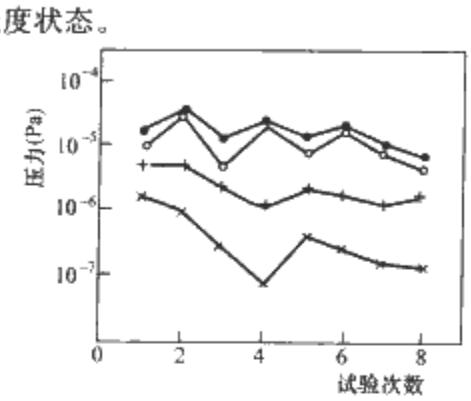


图 4.1-48 一系列大电流分断试验中，真空断路器内剩余气体的分压力和总压力

注：1. ·为总压力；○为氢分压；＋为甲烷分压；×为一氧化碳和氮分压（未分开测量是因为量很小）。

2. 试验条件：用 CuCr 制备径向磁场触头；均方根电流 $I=30$kA，50Hz 半周期；起弧时间 9ms；在每次起弧 60s 后测量压力。

5) 研究表明，电弧作用后 CuCr 触头表面得到“改善”，大约 50μm 厚的表面层含有相当特征细而弥散的 Cr。这是由于约在 1400℃时，大量的 Cr 溶解在 Cu 的熔体中，而当温度低于 1000℃ 以下（即在固态），固溶的 Cr 不到 1%。这意味晶粒粗大的 Cr 粒子在弧根部位被熔化了，Cr 以细颗粒析出（1μm 或更小）形成薄的熔化层，而且比原来的材料硬而脆，使得触头具有良好的抗熔性。

(3) 铜铬系触头材料品种及其性能。不添加任何元素的 CuCr50、CuCr40 及 CuCr25 是当今中压大电流真空断路器的主要触头材料。表 4.1-40 是这 3 种材料的静态物理性能。由该表可以看出它们的物理性能区别并不十分明显，而它们的实际应用范围也没有严格的区分，都可用在 10kV，50kA 以下及 36kV，31.5kA 以下的真空断路器上。虽然日本东芝公司研究表明，Cu 含量的增加有利于大电流的开断，见表 4.1-41，但我国真空灭弧室的研究工作者认为，大量的开断性能研究试验统计尚不能对这一论点提供支持。开关制造厂似乎更多用 CuCr50 材料作真空断路器触头，特别是在开断容量更大的真空断路器上。这是因为 CuCr50 触头在能满足分断能力要求时，其耐压和抗熔焊性能更好些。但在实际中，各开关厂采用何种成分的 CuCr，主要取决于真空断路器的分断和耐压试验的结果。在此基础上，材料性能的稳定性和成本等也是考虑的重要因素。

表 4.1-40 铜铬触头材料的物理性能

材料	密度 (kg/cm^3)	电导率 $(\Omega\cdot\mu m)^{-1}$	硬度 HV	气体含量 ($\times10^{-6}$)		
				H_2	N_2	O_2
$CuCr_{25}$	7.9～8.2	28～33	65～85	2	30	200
$CuCr_{40}$	7.3～7.8	23～29	80～95	3	45	400
$CuCr_{50}$	7.1～7.7	21～27	85～100	3	50	450

表 4.1-41　降低 Cr 含量对 CuCr 触头分断能力的影响

材料	铬含量(%)	分断能力(kA) 20	25	30	35	40
CuCr	25	○○○	○○	○○○	×○×○○○○	
	40	○○○	○○	○○○○○	○×	
	50	○○○	○○○	○○×○○○○×		

注　测试电压为12kV，燃弧时间为10ms；○代表分断成功，×代表分断失败。

(4) 铜铬系触头材料的制造方法。Cu 和 Cr 的不溶性、两相的假合金结构，使其液相合金凝固时 Cr 共晶化和成分偏析趋向严重，产生宏观偏析；Cr 对氧的亲和力极强，生成的 Cr_2O_3 极其稳定，难以被还原以及 Cr 在高温时的蒸汽压很高，挥发大等因素都决定了 CuCr 材料制造工艺的复杂性。

目前 CuCr 触头材料的制造方法主要有：混粉压制烧结法、真空烧结熔渗法、真空熔铸法和真空电弧熔炼法共 4 种。此外，目前在生产中出现了一种为避免单独制造触头元件时容易产生的缺陷，而把触头与真空灭弧室中连接触头的导电部件整体制造的方法，即 R 型真空开关触头制造方法。

1) 混粉—压制—烧结法是传统的粉末冶金工艺。其工艺流程图如图 4.1-49 所示。对铬粉的高温真空处理（10^{-2} Pa 下 1200℃）和氢气还原处理（露点为－70℃的高纯氢）是该工艺降低含气量的关键。在一定的压力下，随压制压力的增加，其相对密度会较快增加。考虑到能耗、模具及设备的损耗等因素，选择成型压力为 7MPa 左右。压制烧结可分为液相烧结和固相烧结。虽然液相烧结使触头的相对密度略大于固相烧结后的触头，但密度提高有限，而且如温度、时间控制不当，容易使 Cu 从压坯中渗漏出来，形成内部气孔缺陷；而固相烧结法虽然触头密度略低，但可通过复压提高其相对密度（提高 4% 左右），而其外形及金相组织也较好，复压压力一般选择在 11MPa 左右。

这种制造方法工艺简单。在 20 世纪 90 年代初期烧结法制造的 CuCr 触头的含气量还比较高，相对密度也较低（96%左右）。随着技术的改进，目前用烧结法制造的 CuCr 的含气量也较低（氧含量也可达到小于 500×10^{-6}），相对密度可达到大于 99%。其主要问题是：Cu、Cr 分布不易均匀，结合不够紧密；材料的韧性也较差。这会影响真空开关的分断性能、耐压强度和运行的可靠性。

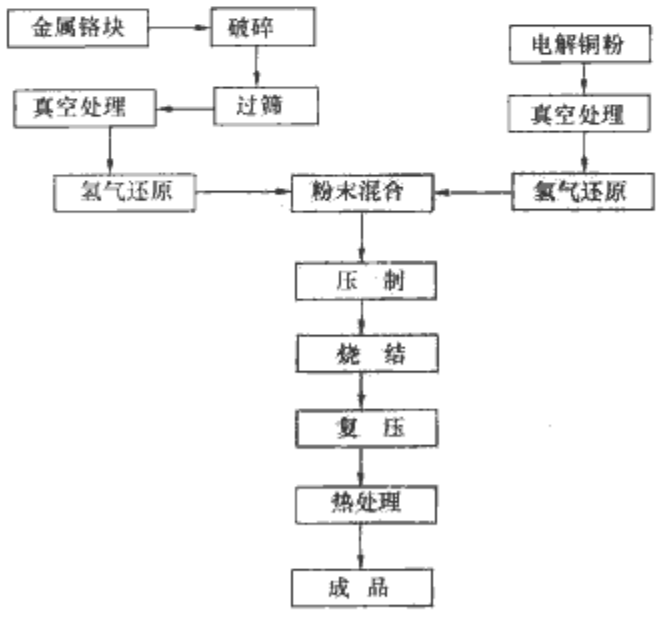


图 4.1-49　CuCr 触头混粉—压制—烧结法工艺流程

2) 真空烧结熔渗法的工艺流程如图 4.1-50 所示，用这种方法可制备含 Cr35% 以上的 CuCr 材料。Cu 与 Cr 结合强度高、触头韧性好，其机械强度和电导率优于烧结法，且触头含气量低，也易控制。但这种方法对 Cr 粉的纯度、含气量、颗粒度及其分布均有严格的要求；易形成气孔及成分偏析的缺陷。虽有这些缺点，但该方法仍然是目前国内生产 CuCr 触头的主要方法。

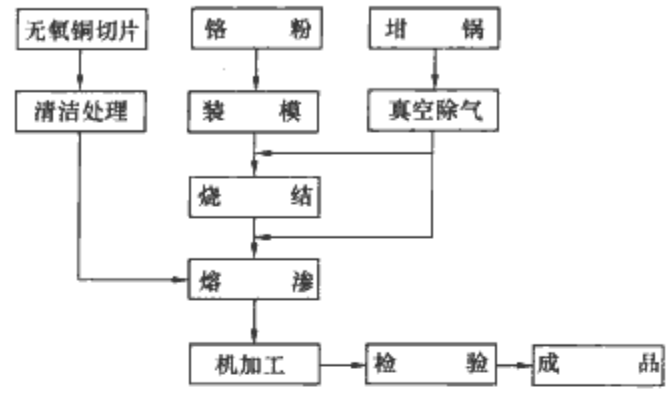
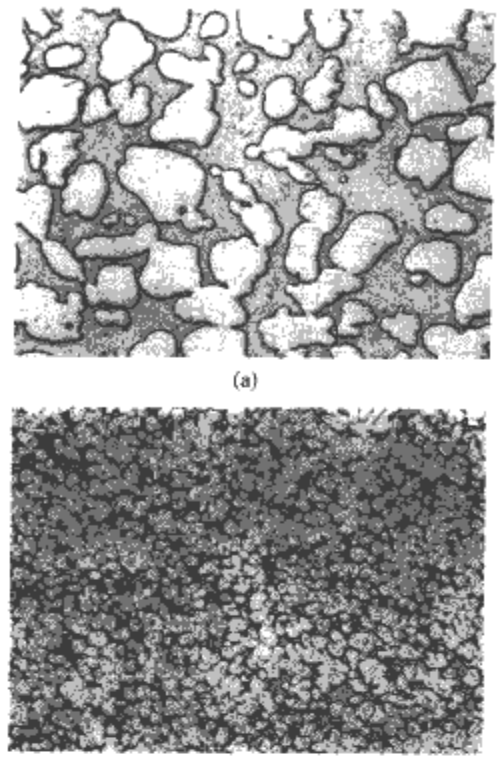


图 4.1-50　CuCr 触头真空熔渗法工艺流程

3) 真空熔铸法（真空感应熔炼快速凝固法）是国内独创 CuCr25 触头材料的制造工艺。即将预烧结的 Cu、Cr 原料在中频感应炉中高温熔化（2000℃左右），在高真空下排气，浇铸，并通过快速冷却获得。该工艺的特点是：高温熔炼并伴有电磁搅拌，可充分去除材料吸附的游离态气体；在高温下互溶的 Cu、Cr 合金，以快速冷却至熔点以下，熔融的合金中立即大量形核，由于冷却速度极快，形核后的晶粒来不及长大，只能形成一定尺寸大小的晶粒。这种工艺的快速冷却过程可以提高合金的互溶度、实现快速形核并且抑制核长大，Cr 相枝晶组织细小均匀（30～70μm），从而实现了 Cr 颗粒的细微化、弥散化、均匀化。这样可以得到指标，触头密度大幅度增加，同时由于 Cu 量的增加，既提高了电导率，又降低了截流值。但这种方法同样可能存在宏观气孔、夹渣和成分微观偏析等缺陷，而且局限于 CuCr25 触头的制造。

4) 真空电弧熔炼法是预先将 Cu 与 Cr 的混合粉末经约 200 MPa 等静压后，在 950℃真空下烧结制成 CuCr 棒，用它作为真空电弧熔炼炉中的自耗电极，电极在直流电弧的高温作用下迅速熔化，熔融的液态金属在水冷铜模中凝固形成铸锭。为了制作真空断路器触头，还需把 CuCr 铸锭挤压，并随后进行时效处理。这种方法将传统的铸造和定向凝固技术有机地结合起来，使相互固溶度很小的 Cu 与 Cr 能够得到理想的显微组织，通过控制加热条件和凝固条件可以形成具有结构致密、成分分布较均匀、晶粒细小（10～30μm）的触头材料，其晶粒大小仅为熔渗法 CuCr 材料的十分之一，见图 4.1-51，基本避免了上述粉末冶金材料的缺陷，因此它的机械性能和电性能均比粉末冶金制备的 CuCr 材料有较大的提高。由于电弧熔炼是在真空或惰性气体下进行加热、熔化的，故可大大地降低材料的含气量，提高合金的纯度，且对原材料的要求也不必像粉末冶金方法那样苛刻。但这种制备方法需要结构复杂的真空系统和直流电弧电源，成本较高。西门子公司 Muller 等人最先采用了这种方法，代替了原先采用的真空烧结熔渗法，并将用电弧熔炼及形变处理后的 CuCr40 成功地用于额定电流 630A 的真空接触器，其寿命超过百万次。

(5) R 型真空开关触头制造工艺。R 型真空开关触头是一种采用传统的粉末冶金方法把 CuCr 触头与真空灭弧室的引弧、导电部件整体地制造为一体的新型真空开关触头结构。这种中央引弧的结构克服了传统灭弧室触头结构在引弧时动静导电杆系统产生变形而引起引弧点离屏蔽筒太近，以致影响开断能力的缺陷。它使金属蒸汽向四周扩散，其密度



(a)

(b)

图 4.1-51 CuCr50 的显微组织
(a) 烧结熔渗法硬度 90HV30；
(b) 电弧熔炼法硬度 122HV30

骤然变小，有利于分断；该结构使电流流经线路短，回路电阻小（比其他结构小 30%～40%）；它无引弧槽，耐电压水平高；具有高可靠的容性负载及感性负载开断能力等特点。而从触头技术来看，它有许多的优点：触头机械强度高，不易变形，分断性能稳定；省去了许多工序（包括焊接等加工工序），节省材料与工时，降低了成本；避免了通常单独制造触头元件时容易发生的缺陷；用这种方法制造触头，在一定范围内其尺寸基本可不受限制。因此是开发大容量真空断路器、提供大直径触头的一种不错的选择。而因其回路电阻小，给出了电阻率提升的空间，那么为了提高真空断路器的电压等级，就有可能在 CuCr 材料中添加微量耐电烧蚀的元素。图 4.1-52 是这种结构的外形，图 4.1-53 为 R 型触头的金相组织。

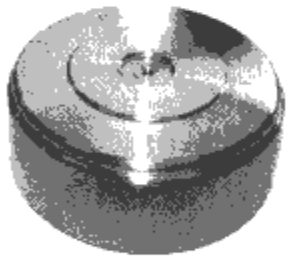


图 4.1-52 R 型触头的外形

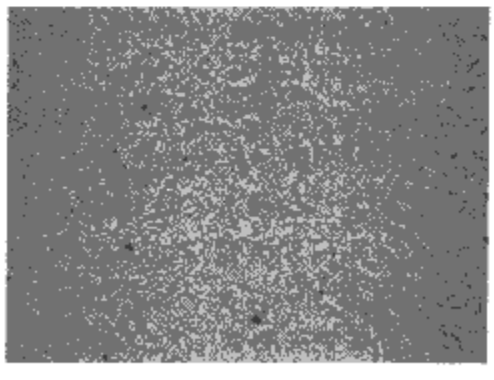


图 4.1-53 R 型触头的金相组织

5.2.2 真空接触器用触头材料

真空接触器是 20 世纪 60 年代末出现的一种具有体积小、重量轻、寿命长、噪声小、电弧不外露等优点的电器。真空接触器的特点是操作频繁，关合电流小，要求触头材料含气量低、具有良好的抗电弧侵蚀能力、抗熔焊性、低的电弧重燃率，以及非常低的截流水平。

(1) 真空电弧的截流现象及截流水平。小电流真空电弧在电流下降到接近自然零点以前常出现不稳定现象。电弧不稳定现象的外观是：阴极斑点突然消失，接着又产生、再次消失、再次产生……如此重复，并在相应的电弧电流、电压示波图上出现工频波上叠加高频分量。在一段不稳定过程以后，阴极斑点最终熄灭，电流在自然过零前截断，这就是真空电弧的截流现象。图 4.1-54 显示的小电流真空电弧的自然波形说明了这一现象：当电流降到零点近傍时发生振荡，最后在自然过零之前电流即已被切断。开始发生振荡的电流 I_c 称为不稳定电流；电流被切断时的瞬时值 I_0 称为截流值，又称截流水平。在实际应用中，在切断小电感电流时要产生截流现象，并伴随有截流过电压。

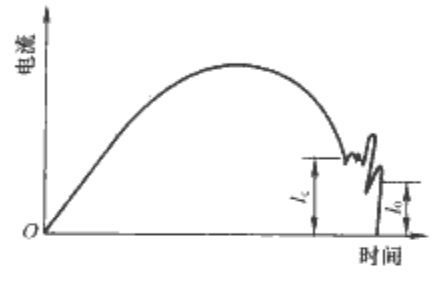


图 4.1-54 小电流真空电弧的电流波形

(2) 真空开关产生截流的原因及影响其截流水平的因素。真空电弧实质上不是在“真空”中燃烧的真空电弧，而是在“金属蒸汽”中燃烧的蒸汽电弧，在完全真空里，电弧是不能存在的。真空电弧产生和维持的过程是：触头在真空中开断电流时，随着触头的分开，接触压力减小，接触点的数量和接触面积也随之减少，电流集中在愈来愈少的接触点上，接触点温度急剧升高，出现熔化。随着触头继续分开，熔化的金属桥被拉长变细并最终断裂产生金属蒸汽。金属蒸汽的温度很高，部分原子可能产生热电离，加上触头刚分离时其间隙距离很短，电场强度很高，将使阴极表面在高温、强电场的作用下发射出大量电子，并很快发展成温度很高的阴极斑点。正是由这些电弧斑点加热触头，使触头材料蒸发，电弧即靠这些蒸汽游离导电而维持。当电流变小时，阴极斑点放出的金属蒸汽粒子变少。如果放出的粒子的密度在维持燃烧所必需的密度以下时，电弧变得不稳定，电流波形出现振动，最后电流被截断，这就是真空开关产生截流的原因。

由于真空电弧完全依靠触头材料自身提供的蒸汽来维持，故真空电弧的特性与触头材料的关系极为密切。

影响真空开关截流水平的因素有：

1) 触头材料的饱和蒸汽压力。蒸汽压愈高的材料蒸发的金属愈多，易于维持电弧的稳定，截流值愈小。但触头材料的蒸汽压力不能过高，否则将使间隙的绝缘强度降低。

蒸汽压力低的金属，如钨、钼具有很大的截断电流（达 10A）。而低熔点金属，如铅、锑的截流值很低。由两个金属组成的复合材料较单体金属的截流值低，特别是含有低熔点金属的材料。

2) 触头材料的沸点 T_b 与热导率 λ 的乘积。乘积愈大，截流值一般也愈高。但触头材料的热传导系数不能过低，否则将使切断大电流的能力变坏。表 4.1-42 给出了一些金属材料的截流值与 λT_b 乘积之间的关系。但当用合金作为触头材料时，情况比较复杂，如在多孔的难熔金属（W、Cr）中浸渍易熔金属（如 Cu 或其合金）组成的触头材料中，以钨

构成合金材料的骨架，其热导率 λ 小；而铜或其合金填充在骨架的孔隙中，它们的沸点 T_b 低，结果 λT_b 的乘积小，因而截流值也小。这样的钨铜合金材料（W80%－Cu20%）的截流值只有 5～6A，比两种金属（钨与铜）自身的截流值要小。又如 CuCr 合金材料（Cu50%－Cr50%）的截流值为 4～5A，也比铜、铬金属自身的截流值小。

表 4.1-42　　金属材料的截流值与 λT_b 乘积之间的关系

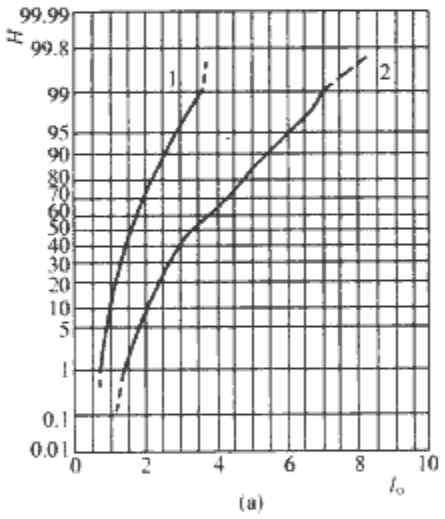
材　料	钼 (Mo)	钨 (W)	银 (Ag)	铜 (Cu)	铝 (Al)	锡 (Sn)	锑 (Sb)	铋 (Bi)
λT_b [cal/(cm·s)]	1280	2820	1950	2140	935	350	61.5	22.8
截流值 (A)	5.7～6.7	12～21	7.0～7.5	16～18	12～13	1.0～2.3	0.5～0.6	1～1.2

注　1cal=4.18J。

3）触头的运动速度。速度过高，截流值也增大。所以真空开关的触头运动速度要限制在一定数值下。试验研究指出，开分速度在 0.3～1.5m/s 范围内，对截流值没有影响。

4）切断电流的大小。切断电流增加时，截流现象逐渐消失。

5）截止电流值是个统计分布数值。图 4.1-55(a) 显示 WCu30Sb4 合金触头在未使用过与经历 AC4 工作制下 10 万次分断周期后测得的截流值分布情况。图 4.1-55(b) 显示 WCu30Sb1 因得到制造工艺的控制，形成了一个稳定的钨颗粒骨架，这种组织的材料不受 AC4 工作制下 10 万次寿命试验的影响，其截流值分布曲线不变。



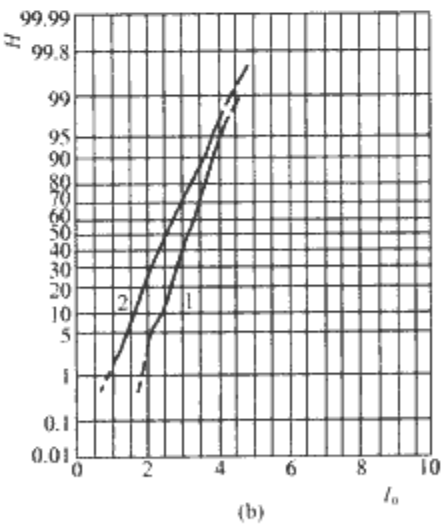


图 4.1-55　WCuSb 触头材料截止电流的分布

（a）WCu30Sb4 的截流值分布曲线；

（b）WCu30Sb1 的截流值分布曲线

注：曲线 1 为新触头的截止电流分布情况；曲线 2 为 AC4 工作制下 10 万次分断周期后的截止电流分布情况。

（3）某些金属和真空触头材料的截流值 I_o。表 4.1-43 中汇编了不同研究者在不同条件下实验得到的各种金属及真空开关触头材料的截流值。由于截流值取决于触头并联电容，所以这些数据之间不能进行精确的比较。

表 4.1-43　　多种金属及真空开关触头材料的截流值

纯金属	截流值 (A)	真空开关触头材料 (质量分数)(%)	截流值(A)	
			平均值	最大值
Pb	0.3～0.5	CuCr75	4.75	15
Sb	0.5～0.6	CuCr50	4.5	10
Bi	1.0～1.2	CuCr40	4.5(99%的值)	
Zn	0.9	CuCr25	4	8
Sn	1.0～2.3	Cr25CuBi5	1.1	13.1
Mn	3	Cr25CuBi15	0.78	11.1
Mo	5.7～6.7	$Cr25CuBi_2O_35$	1.2	13.8
Cr	5.5～6.5	$Cr25CuBi_2O_315$	0.75	12.6
Ni	6.2～7.8	Cr25CuSb2	5.2	7.5
Zr	9.5～11	Cr25CuSb9	4	10.5
W	18～21	WCAg25	0.5	1.1
Cu	16～18	WCAg40	0.75	1.4
Ag	7～7.5	WCAg50	1.1	2.2
Al	12～13	WCu30	5	10
		WCu30Sb1	3	5.3
		WCu30Sb4	1.6	3.8
		WCu30Li0.24	22.1	63
		WCu30SbBi10	0.8	1.8
		CuBiPb1	5	11
		CuBiPb13	1	2
		CoAgSe	0.4	0.8
		MoCu45	6.5(99%的值)	
		MoCu25	5.5(99%的值)	
		CuFe50	5(99%的值)	

（4）常用真空接触器触头材料的种类、成分与性能。为了获得综合性能好的真空接触器触头材料，通常采用几种物理性能差异较大的金属或化合物，用各种不同工艺制成复合材料。目前国内外应用的真空接触器触头材料有以下几大类：

1）钼基锑铋镶嵌式触头。这类触头是以 Mo 为基体镶嵌少量的 Sb 和/或 Bi 金属。其截流值较低(<0.7A)，抗熔焊性好，但由于含有大量的低熔点金属，故耐压及开断能力都较低(使用等级在 6kV/4～6kA)，也不能采用一次真空封排工艺，因而造价也较高，现在已很少使用了。

2）AgWC(Cu)低截流值触头材料。这类材料 Ag 或 Cu 质量的含量在 15%～40%，利用了 Ag(Cu) 良好的导电、导热性和硬质合金组分碳化钨(WC)的耐电弧烧蚀。因为 WC 的功函数小，电弧放电的光谱测量设备试验表明，触头表面由于 WC 的温度高于 Cu，有足够的热量去加速 WC 的热发射和 C 的蒸发，所以，以 WC 为基的触头显示出低的截流电流，该材料采用粉末压制、烧结和熔渗工艺。但选择最适宜的含碳量并使其存在的状态为非固溶态或非化合物形成态

是关键，这样不仅可以抑制受电弧作用时 Ag(Cu)的优先蒸发、飞散，还可以抑制发生对电弧重燃有害的龟裂现象，并减少 WC 粒子的飞溅、脱落。

日本的研究工作表明，在优化了的 AgWC 材料中，当 Ag 的含量减少到 20%（质量），其截流水平为最小，将降到 0.5A(标准偏差 0.2A)，如图 4.1-56 所示。而且它的工频电流开断能力在 7.2kV 电压的条件下，将由原来的 25kA 提高到 40kA 以上。在这种触头材料中加入微量添加物，如锆(Zr)等，可以改善 Ag 对 WC 的润湿性，从而减少在燃弧时产生 WC 粉粒，使得由微粒引发的击穿并产生重燃的次数减少，以延长触头电寿命。

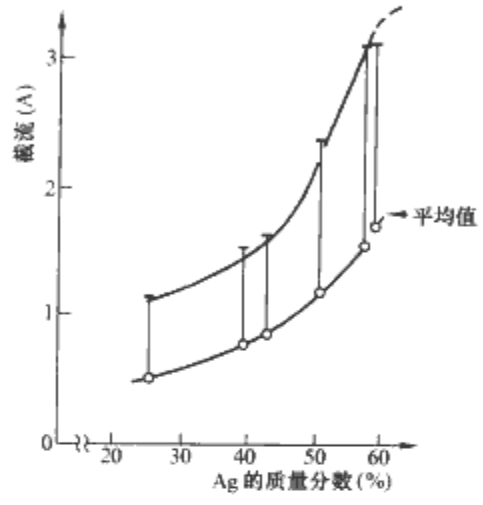


图 4.1-56 AgWC 材料 Ag 含量与截流值的关系

ABB公司生产的真空接触器灭弧室 VS1 型(7.2kV，400A)及 VS2 型(12kV，400A)的触头材料采用的就是 Ag-WC。其触头电寿命在额定电流下达几百万次，而截流值在 0.5A 范围内。

AgWC(Cu)低截流值触头材料由于碳化钨热导率低，电阻率大，发热严重，因而额定电流和开断电流均较小。且虽然其截流值很低，但由于 Ag 的价格较贵，来源较少，故该材料大多只用于对截流值要求非常严格的真空接触器中。也有用 Cu 代替 Ag 制成 WCCu 触头材料的，虽然它的价格低，但截流水平较高。

3) WCu 系材料。根据不同的使用条件和要求而开发钨基或钼基的触头材料，如 WCu、WAg 等，为降低截流值和提高抗熔焊性，在 WCu 中添加约 1%（质量）的 Te 或 Sb，使截流值由约 6A(平均值)降低到接近 2A(平均值)的水平。这类材料中获得实际应用的主要有 WCu30Sb、WCu30Te 及 WCu30WC 等。

① WCuSb 触头材料。Sb 组元的含量显著影响着材料的截流特性。AC 电寿命试验表明，阴极表面因存在有较高热导率的富 Cu 和富 CuSb 合金而减慢金属蒸汽的产生，使截流值较高，表 4.1-44 显示了 WCu30Sb 材料的截流值分布。经过优化选择并通过改进制造工艺，确认 WCuSb1 材料具有良好的截流值分布和稳定性。

② WCu30Te 触头材料。Sb 是强烈降低 Cu 的导电、导热性的元素。与 WCu30 的电导率（30MS/m）相比，WCu30Sb1 的电导率仅为它的一半，作为触头材料这是不利的。经研究发现，在 WCu30 中加入 Te 对材料的电导性能影响不大，却能提高材料的抗熔焊性和降低截流值。随着 Te 添加量的增加，WCu30 材料的截流值呈下降趋势，但过量的 Te 将降低 WCu30 材料的分断能力和耐压特性。通过选择合适的 W 粉粒度及粒度分布，控制 Te 的添加量，可制得具有最佳综合性能的 WCu30Te 触头材料。该材料的平均截流值<1.5A，最大截流值<4.5A。几年来它已应用于国内 10kV 以下(包括 10kV)的各等级真空接触器中，其分断能力为 5kA。

表 4.1-44 WCu30Sb 材料的截流值分布

材 料	截流值(A)	
	50%	99.5%
WCu30	3.3	5.3
WCu30Sb1	2.8	5.3
WCu30Sb4	1.6	3.8
无氧铜	20	25
CuSb7	6	9
WCuSb1①	2.5	4.7
WCuSb4①	3.3	8

① 电寿命试验后测定的值。

③ Cu30WC 触头材料。这是取上述 WCu 系和 WCCu 系触头材料之长，避它们之短的材料。WCu 系触头材料是靠材料中的低熔点组元或其化合物的蒸发来降低截流值和提高抗熔焊性的。但随着开关的运行，触头表面的低熔点元素挥发过多，当低熔点元素含量降到一定程度时，其降低截流值和抗熔焊性的作用将逐渐失去，致使 WCu 触头发生熔焊，截流值增高。为了克服这一问题，可用适量的 WC 代替 WCu 材料中的低熔点元素。而相对 WCCu 触头材料来说，用适量的 W 替代部分 WC，可提高热导率和电导率，相应也提高了分断能力。控制 WC 的添加量和降低材料的含气量是制取 WCu30WC 材料的关键。该材料的平均截流值小于 2A，最大截流值小于 4A，其他物理力学性能及应用范围见表 4.1-45。

表 4.1-45 典型 WCu30WC 触头材料的性能及应用范围

材 料	密度 (g/cm^3)	硬度 HB (MPa)	导电度 IACS (%)	含气量 ($\times10^{-6}$)	性 能	应 用
CuWWC-1	≥13.5	≥1900	≥35	≤80	耐电磨损好	1.14kV 以下真空交流接触器
CuWWC-2	≥13.5	≥1900	≥35	≤80	耐电压高	10kV 或 6kV 等级真空交流接触器
CuWWC-3	≥13.5	≥1900	≥35	≤80	截流值小	3kV 等级真空交流接触器

4) CuCr 系触头材料。在发展高耐压、大开断容量的真空开关的同时，要求有低的操作过电压是新型真空开关的主要趋势。为满足一些特殊电路，如存在感应电动机和变压器的强电感电路，需要具有较大的开断能力和较高耐压水平的低截流值触头材料。上述几种低截流值触头材料都难以满足此要求。

与 WCAg(Cu)系、WCu 系等真空接触器触头材料相比，虽然 CuCr 的截流值相对较高(2～6A)。但 CuCr 各方面的良好电性能可为制备具有较大开断能力和较高耐压的低截流值触头材料提供可能性。降低 CuCr 触头材料截流值的主要途径有多种，如添加金属氧化物(Bi_2O_3)；添加金属碳化物(MoWC)或添加低熔点金属的化合物(Ag_2Se)等。

5.3　改进 CuCr 触头材料性能，满足真空开关发展的要求

由于真空开关在性能上、可靠性上有了很大的提高，已能满足中压开关多种用户的要求，电力用户对真空开关也已取得了丰富的运行经验，真空断路器已成为中压断路器主流，并向着高电压、大容量迅速发展。现在单断口真空灭弧室的额定电压已分别达到 123kV、145kV，、168kV 的水平。开断电流能力最高可达 100kA。日本已经研制出 145kV，40kA 单断口真空灭弧室，正在进行 252kV 单断口真空断路器的研制。目前，我国已能生产额定电压 12～40.5kV、额定电流最高达 4000A、开断电流 63kA 的真空断路器，已完成了 15kV/120kA 产品的研究。在高电压方面，126kV 真空灭弧室的研究工作也在进行中。

SF_6具有严重的温室效应，《联合国气候变化框架公约京都议定书》附件 B 做出了对 SF_6气体排放量限制或消减的承诺，这也促使世界各国开展使真空断路器多功能化和集成化的工作，并力争向高电压等级的真空断路器发展，可以预期，未来真空开关会有更大的发展和更广阔的应用市场。

要满足真空开关发展的需要，关键是对灭弧室电极结构进行设计优化、改进 CuCr 触头材料某些性能及研制大直径触头材料等问题。近年来，通过添加第三组元素来改进 CuCr 材料性能的研究比较多。

为适应某些特殊性能要求，国内外研制了多种 CuCr 旁系材料，如我国有单位研究加 Fe 的 CuCr 材料，认为加 Fe 可增加 Cu 与 Cr 颗粒间的润湿性，起活化烧结作用，增加了 CuCr 材料的硬度和强度，从而提高了耐压性能。日本三菱公司研究了加入 0.5%～1%的 Si、Ti、Al 或 Zr，以改进 CuCr 的耐压特性。研究者认为，Ti、Zr 与氧的亲和力远大于 Cr，添加之后可使 Cr 表面的氧转移到 Ti、Zr 上，增加了 Cu 与 Cr 的浸润性，使 Cu 与 Cr 结合得更好，从而提高了耐压性能。三菱公司还进行了加入钽（Ta）改进 CuCr25 耐压性能的研究。研究结果显示，当 Ta 含量达 10%～20%时，CuCr25 Ta 的分断能力较 CuCr2 提高约 70%，当 Ta 含量超过 20%以后分断能力便下降。Ta 含量的增加与 CuCr25 耐电压的提高几乎是线性关系，所以 CuCr25 添加 Ta 的含量宜取 15%左右。这一结果显示，加入添加物的 CuCr 触头材料为真空开关向高电压等级发展提供了潜在的可能。此外，西门子公司详细地研究了 Zr、Ti 对 CuCr 触头材料性能的影响。由扫描电子显微镜显示：Zr 的加入形成了 Cu5 Zr 相，使得材料的硬度增加；而加入的 Ti 分别 与 Cu 及 Cr 形成固溶体，使 CuCr 的硬度和强度上升较大。反映在电性能方面，Zr 与 Ti 使材料的耐压性能得到提高，并降低了材料的抗熔焊性。

真空开关操作过电压主要由截流和多次重燃产生，故为获取低过电压触头材料，除降低材料的截流值以外，还需要降低高频电流的开断能力。德国工业大学（BW 大学）在 CuCr25 材料中添加锌（Zn）进行工频电流开断试验和高频电流开断试验的结果表明，在 CuCr 材料中添加 Zn 既不影响工频电流开断能力，又能使高频电流开断能力下降。由于 Zn 属于高蒸汽压材料，估计还能降低材料的截流值。

但上述这些 CuCr 旁系材料大多还停留在研发和应用试验阶段。

不成功的真空开关试验常是因产生延时重击穿现象所致，即非自持破坏性放电，简称 NSDD 现象。这是指真空开关分断电流过零，电弧熄灭以后经过几十 ms 到几 s 的长延时再发生击穿的现象。延时重击穿不仅使真空开关的运行可靠性降低，还可能出现高达数倍以上的过电压。关于延时重击穿现象产生的机理，大多认为是微粒效应而引起重击穿。根据微粒效应的论点，减少或消除延时重击穿的最好途径是改进触头结构及现有的 CuCr 触头材料，所以，寻找既不产生延时重击穿又不使其他性能变坏的新 CuCr 材料是当前真空开关发展的任务之一。

我国有条件生产灭弧室、真空开关和触头材料的制造公司正在致力于高压等级的真空断路器的开发，例如对添加元素进行筛选，确定其合适的含量以提高触头材料的耐压水平和开断能力而采用 CuMoCr 触头材料就是其中的一种尝试。还有，对触头熔化、搅拌和结晶过程中工艺参数的控制和优化等工作也正在研究之中。不过，昂贵的真空开关的电性能试验费用限制和影响了新型触头材料的开发。

第 2 章 热 双 金 属

1 热双金属的组元合金

热双金属是由两种或两种以上不同膨胀系数的金属或合金沿整个接触面牢固复合在一起组成的，具有随温度变化而发生形状变化的复合功能材料。

在热双金属的组元合金中，膨胀系数较高的一层组元合金一般称为主动层或高膨胀层（HES），膨胀系数较低的一层组元合金称为被动层或低膨胀层（LES）。在主动层和被动层之间加入不同厚度的中间层作为导流层，可以获得热敏感性能基本相同而电阻率不同的一系列电阻型热双金属。在某些容易扩散的组元合金（如高膨胀合金 Mn72Cu18Ni10 等）之间加入防止扩散层，可以避免合金之间产生过渡扩散而影响性能的稳定。

1.1 热双金属的主动层合金

热双金属的主动层合金要求膨胀系数大，熔点高，复合性好，弹性模量与被动层合金相差不大。可作为主动层材料的合金很多，有铁镍铬、铁锰镍、锰铜镍、纯镍、纯铁、蒙乃尔合金、黄铜、青铜及不锈钢等。常用的主动层合金一般包括 Mn72Cu18Ni10、Ni22Cr3、Ni20Mn6、Ni18Cr11、Ni19Cr2 和 Ni25Cr8 等高膨胀合金。这些合金的化学成分见表 4.2-1，热膨胀系数见表 4.2-2，物理性能见表 4.2-3，硬度值见表 4.2-4。

表 4.2-1 热双金属常用的主动层合金的推荐化学成分

组元层合金牌号	化学成分①（%）								
	Ni（公称值）	Cr	Fe	Cu	Mn	Si	C	S	P
Mn72Cu18Ni10	10.0	≤0.25	≤1.00	18.0	72.0（公称值）	≤0.25	≤0.10	≤0.030	≤0.030
Ni22Cr3	22.0	3.0（公称值）	余量	—	≤0.60	≤0.30	0.12（公称值）	≤0.025	≤0.025
Ni20Mn6	20.0	…	余量	—	6.5（公称值）	≤0.30	≤0.05	≤0.010	≤0.020
Ni18Cr11	18.0	11.0（公称值）	余量	—	≤0.80	≤0.50	≤0.15	≤0.025	≤0.025
Ni19Cr2	19.0	2.0（公称值）	余量	—	1.0（公称值）	≤0.40	0.5（公称值）	≤0.025	≤0.025
Ni25Cr8	25.0	8.0（公称值）	余量	—	≤1.00	≤1.00	≤0.15	≤0.025	≤0.025
Ni	99.5	≤0.50	≤0.40	≤0.25	≤0.35	≤0.35	≤0.15	≤0.010	≤0.015

注 表中列出了主要元素的公称值，这些公称值可由制造者调整以便符合列于表 4.2-2 的热膨胀系数要求，其他痕量元素没有列出，这些没有列出的元素其数量应不足以显著影响材料的使用性能。

① 质量分数。

表 4.2-2 热双金属常用的主动层合金的线性热膨胀系数值（从 25℃到所示温度）

合金牌号	热膨胀系数值				退火温度（℃）
	93℃	149℃	260℃	371℃	
Mn72Cu18 Ni10	27.2	27.7(±4%)	28.1	29.9	788
Ni22Cr3	19.3	19.35(±4.5%)	19.6	19.6	871
Ni20Mn6	19.7	19.80(±4%)	20.4	20.7	800
Ni18Cr11	18.0	18.0(±4%)	18.4	18.7	1093
Ni19Cr2	20.0	19.4(±4%)	20.2	20.2	1038
Ni25Cr8	17.6	17.6(±4%)	18.0	18.2	982
Ni	13.3	13.5(±4%)	14.0	14.8	704

注 1. 表中所列的线性热膨胀系数的单位是 10^{-6}/℃。

2. 表中给出了每一种指定的合金在 149℃时的热膨胀系数的允许公差，给出的在 93℃、260℃和 371℃的值是有代表性的，但只供参考。

3. 退火温度是指每一种合金在热膨胀系数测试前退火处理的温度，退火在保护气氛（非氧化气氛）下至少进行 1 小时，加热速度为 538℃/h，冷却速度为 38～260℃/h。

表 4.2-3 热双金属常用的主动层合金的物理性能

合金牌号	Mn72Cu18Ni10	Ni22Cr3	Ni18Cr11	Ni20Mn6	Ni25Cr8	Ni19Cr2
公称电阻率（μΩ·cm）	170	77	79	77	85.6	78
密 度（g/cm³）	7.21	8.18		8.1		8.10
比热容[cal/(g·℃)]		0.12		0.12		0.13

注 1. 组元合金的电阻率应符合本表所列的公称值，其公差是±4%。测试前，试样应在 370℃温度下保温 1h。

2. 1cal=4.18J。

表 4.2-4 热双金属常用的主动层合金的最大维氏硬度（退火态）

合金牌号	Mn72Cu18Ni10	Ni22Cr3	Ni18Cr11	Ni19Cr2	Ni25Cr8	Ni20Mn6
硬度	120	130	144	144	135	130

1.2 热双金属的被动层合金

热双金属的被动层合金一般使用膨胀系数低的镍铁合金。1896 年法国科学家 Guillaume 发明了因瓦合金，在室温下，其膨胀系数非常低，仅约 1.2×10^{-6}/℃，为热双金属的开发打下了基础。常用的被动层合金一般包括 Ni36Fe、Ni39Fe、Ni40Fe、Ni42Fe、Ni45Fe 和 Ni50Fe 等低膨胀合金或定膨胀合金。这些合金的化学成分见表 4.2-5，热膨胀系数见表 4.2-6，物理性能见表 4.2-7，硬度值见表 4.2-8。

表 4.2-5　　热双金属常用的被动层合金的推荐化学成分

组元层合金牌号	化学成分①(%)								
	Ni	Cr	Fe	Co	Mn	Si	C	S	P
Ni50	49.50～50.50	≤0.50	余量	≤0.50	≤0.50	≤0.25	≤0.12	≤0.025	≤0.025
Ni45	44.50～45.50	≤0.50	余量	≤0.50	≤0.50	≤0.25	≤0.12	≤0.025	≤0.025
Ni42	41.50～42.50	≤0.50	余量	≤0.50	≤0.50	≤0.25	≤0.12	≤0.025	≤0.025
Ni40	40.0(公称值)	≤0.50	余量	≤0.50	≤0.50	≤0.25	≤0.12	≤0.025	≤0.025
Ni39	38.30～39.00	≤0.50	余量	≤0.50	≤0.60	≤0.40	≤0.15	≤0.025	≤0.025
Ni36	35.50～36.50	≤0.50	余量	≤0.50	≤0.50	≤0.25	≤0.12	≤0.025	≤0.025

注　表中列出了主要元素的公称值，这些公称值可由制造者调整以便符合列于表 4.2-6 的热膨胀系数要求，其他痕量元素没有列出，这些没有列出的元素其数量应不足以显著影响材料的使用性能。

① 质量分数。

表 4.2-6　　热双金属的被动层合金的线性热膨胀系数值（从 25℃到所示温度）

合金牌号	热膨胀系数值				退火温度(℃)
	93℃	149℃	260℃	371℃	
Ni50	10.3	10.1(±8%)	10.3	10.1	871
Ni45	7.9	7.7(±8%)	7.3	7.2	871
Ni42	5.6	5.4(±8%)	5.2	5.4	871
Ni40	3.6	4.0(±8%)	4.0	5.4	871
Ni39	2.3～3.4	2.5～3.6	2.7～3.6	5.0～5.9	871
Ni36	0.9～1.9	1.4～2.5	3.6～4.9	6.7～7.9	871

注　1. 表中所列的线性热膨胀系数的单位是 $10^{-6}/℃$。

2. 表中给出了每一种指定的合金在 149℃时的热膨胀系数的允许公差，给出的在 93℃、260℃和 371℃的值是有代表性的，但只供参考。

3. 退火温度是指每一种合金在热膨胀系数测试前退火的温度，退火在保护气氛(非氧化气氛)下至少进行 1h，加热速度为 538℃/h，冷却速度为 38～260℃/h。

表 4.2-7　　热双金属常用的被动层合金的物理性能

合金牌号	Ni50	Ni45	Ni42	Ni40	Ni39	Ni36
公称电阻率(μΩ·cm)	40.7	54.8	61.5	63.2	70.6	80.6
密度(g/cm³)	8.25	8.2	8.12	8.10	8.08	8.05
比热容[cal/(g·℃)]	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
居里温度(℃)	500	440	380	350	340	280

注　1. 组元合金的电阻率应符合本表所列的公称值，其公差是±4%。测试前，试样应在 370℃温度下保温 1h。

2. 1cal=4.18J。

表 4.2-8　　热双金属常用的被动层合金的最大维氏硬度（退火态）

合金牌号	Ni50	Ni45	Ni42	Ni40	Ni39	Ni36
硬度	135	135	135	135	135	135

镍的含量对铁镍合金的膨胀系数影响很大，当镍含量是 36%时，膨胀系数最低，约为 $1.2\times10^{-6}℃^{-1}$。图 4.2-1 是在室温下，不同镍含量与铁镍合金膨胀系数的关系图，从图中可以看出，当镍含量低于 36%时，膨胀系数随着镍含量的增大而降低，达到 36%时出现膨胀系数最低的拐点，然后膨胀系数随着镍含量的增加而提高。镍含量为 36%的铁镍合金也被称作因瓦合金（Invar Alloy）。在因瓦合金的基础上，通过加入大约 5%的钴，开发了超级因瓦合金（Super Invar Alloy），其膨胀系数更低，在室温下，超级因瓦合金的膨胀系数只有约 $0.7\times10^{-6}℃^{-1}$，但超级因瓦合金在热双金属中应用比较少。

因瓦合金的膨胀系数受温度的影响较大，当温度升高时，膨胀系数迅速提高，为此，人们进一步开发了定膨胀合金，其膨胀系数较低，当温度变化时，膨胀系数基本不发生变化，如图 4.2-2 所示。这类材料被广泛用作热双金属的被动层材料。

由图 4.2-2 可见，含 Ni36 因瓦合金的膨胀系数在加热到 150℃以上时明显增大。含 Ni39 的铁镍合金的膨胀系数在加热到 260℃以上时明显增大。而含 Ni40、Ni42、Ni45、Ni50 的铁镍合金的膨胀系数在 90～400℃范围内基本不变。

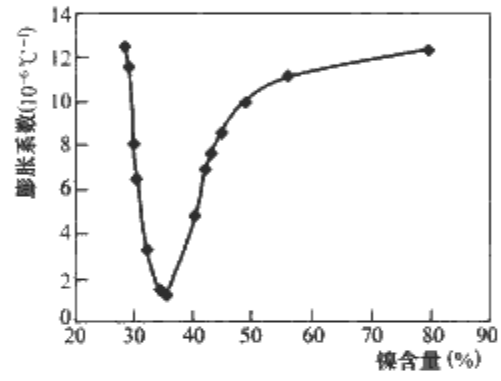


图 4.2-1　铁镍合金的室温膨胀系数曲线

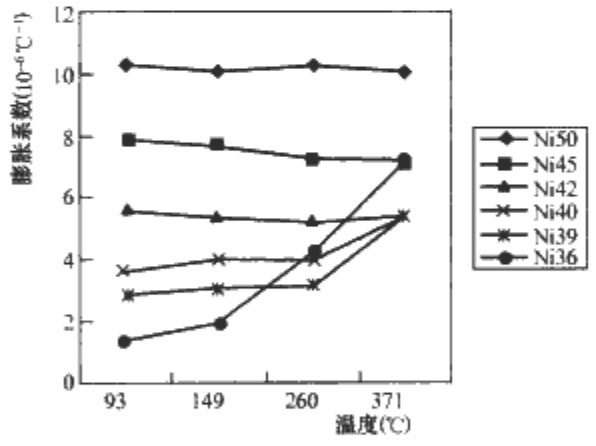


图 4.2-2　铁镍合金的膨胀系数与温度关系曲线

1.3　热双金属的中间层合金

为了得到不同电阻率的热双金属，通常在主、被动层之间加入电阻率极低的金属材料，一般包括纯镍、纯铜（紫铜、无氧铜）和锆铜等，主要用于控制热双金属的电阻率。

2　热双金属的性能指标

2.1　热敏感性指标

热敏感性能是热双金属最重要的性能之一。热双金属的热敏感性能有 3 种表示方法：温曲率（flexivity）、比弯曲（specific deflection）和弯曲常数，它们的测量方法各不相同。由于组元合金的膨胀系数与温度的变化并不是线性关系，因此在不同测量温度范围内，热敏感性能指标不是一个

常数，不同的测量温度范围，其数值存在差异，因此在测量时必须指定一个测量温度范围，美国 ASTM B388 标准规定的测量温度范围是 10～93℃，德国 DIN1715 标准规定的测量温度范围是 20～130℃。

温曲率 F 是单位厚度的热双金属片每变化单位温度时其纵向中心线的曲率变化。当热双金属片的厚度≥0.3mm 时，温曲率的测量方法采用简支梁法，图 4.2-3 是简支梁法测量温曲率的测量示意图，其温曲率的计算公式为

$$F=\frac{8\delta}{T_2-T_1}\left[\frac{D_2}{(L^2+4D_2\delta+4D_2^2)}-\frac{D_1}{(L^2+4D_1\delta+4D_1^2)}\right]$$

式中：F 为温曲率，$℃^{-1}$；δ 为试样厚度，mm；D_1 为温度为 T_1 时的试样两支点间中点位置的垂直位移，mm；D_2 为温度为 T_2 时的试样两支点间中点位置的垂直位移，mm；L 为试样测量长度（两支点间的长度），mm；T_1 为测量初始温度，℃；T_2 为测量终了温度，℃。

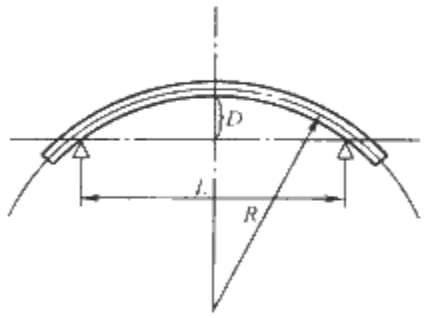


图 4.2-3 简支梁法测量温曲率的测量示意图

当热双金属片的厚度<0.3mm 时，温曲率的测量方法采用平螺旋法，其温曲率的计算公式为

$$F=\frac{0.0154\ (A_2-A_1)}{T_2-T_1}\frac{\delta}{L}$$

式中：F 为温曲率，$℃^{-1}$；δ 为试样厚度，mm；A_1 为温度为 T_1 时的试样测量端的角度，（°）；A_2 为温度为 T_2 时的试样测量端的角度，（°）；L 为试样测量长度，mm；T_1 为测量初始温度，℃；T_2 为测量终了温度，℃。

比弯曲 K 是单位厚度的热双金属片在每变化单位温度时，纵向中心线的曲率变化的二分之一。它采用悬臂梁法测量，图 4.2-4 是比弯曲悬臂梁法测量示意图，其计算公式为

$$K=\frac{\delta}{T_2-T_1}\left[\frac{\Delta f+f_1}{L^2+(\Delta f+f_1)^2+(\Delta f+f_1)\times\delta}-\frac{f_1}{L^2+f_1^2+f_1\delta}\right]$$

式中：K 为比弯曲，$℃^{-1}$；δ 为试样厚度，mm；f_1 为温度为 T_1 时的挠度，mm；L 为试样测量长度，mm；T_1 为测量初始温度，℃；T_2 为测量终了温度，℃；Δf 为测量温度为 T_2 和 T_1 时试样的挠度差，mm。

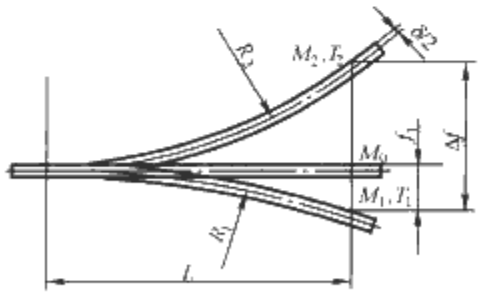


图 4.2-4 比弯曲悬臂梁法测量示意图

弯曲常数（K'）是一端固定的单位厚度和单位长度的热双金属片，当温度变化 1℃时，其自由端的挠度变化。它采用悬臂梁法测量，其计算公式为

$$K_c=K_c'\frac{\delta}{L^2}$$

式中：K_c 为热双金属弯曲常数，$℃^{-1}$；K_c' 为拟合直线斜率，mm/℃；δ 为试样的厚度，mm；L 为试样的工作长度，mm。

拟合直线斜率的计算公式为

$$K_c'=\frac{\sum_{i=1}^{n}T_i\sum_{i=1}^{n}Y_i-n\sum_{i=1}^{n}T_iY_i}{\left(\sum_{i=1}^{n}T_i\right)^2-n\sum_{i=1}^{n}T_i}$$

式中：T_i 为各点测量温度，℃；Y_i 为相对测量温度 T_i 时的对应挠度，mm；n 为测量点数。

由于比弯曲和弯曲系数在测量时一端固定，其测量过程受固定端的夹持力和夹持方式影响，测量数据的重复性和复现性不是很好，而温曲率采用几乎无约束的测量方式，其测量的重复性和复现性都比较好，因此目前大部分国家标准和行业标准及公司标准都采用温曲率指标作为热双金属的热敏感性考核指标，以比弯曲作为参考指标。如美国 ASTM B388 标准一直采用温曲率指标，德国 DIN1715 标准在 1983 年修订标准时，由原来的比弯曲指标改为温曲率指标来衡量热双金属材料的热敏感性能。日本 JIS2530 标准则采用弯曲常数作为考核指标。温曲率与比弯曲指标存在一定的关系，他们之间的经验数值是比弯曲值大约是温曲率值的 0.53 倍（这是一个经验值）。

目前常用的热双金属的温曲率范围一般为（11×10^{-6}～40×10^{-6}）$℃^{-1}$。

2.2 电阻率

电阻率是热双金属的一个重要性能指标。当热双金属不直接通电加热时，电阻率的影响可以不考虑，但是当热双金属直接通电加热时，电阻率就是一个非常重要的性能指标，发热量与电阻率成正比，这将直接影响热双金属的动作特性，也影响到可通电流的大小。热双金属的电阻率范围一般为 2.5～140μΩ·cm。

电阻率的测量一般使用电桥或毫欧计测量，计算公式为：

$$\rho=\frac{RS}{L}$$

式中：ρ 为电阻率，单位为微欧厘米（μΩ·cm）；R 为试样测量电阻值，单位为微欧（μΩ）；S 为试样截面积，单位为平方厘米（cm^2）；L 为试样测量长度，单位为厘米（cm）。

热双金属的电阻相当于各组元层电阻的并联电阻，其电阻率取决于各组元层的电阻率及其厚度比，3 层的热双金属电阻率设计时采用下面的公式进行计算：

$$\frac{h}{\rho}=\frac{h_1}{\rho_1}+\frac{h_2}{\rho_2}+\frac{h_3}{\rho_3}$$

式中：ρ 为热双金属的电阻率；h 为热双金属的厚度；ρ_1 为热双金属主动层的电阻率；h_1 为热双金属主动层的厚度；ρ_2 为热双金属中间层的电阻率；h_2 为热双金属中间层的厚度；ρ_3 为热双金属被动层的电阻率；h_3 为热双金属被动层的厚度。

2.3 线性温度范围

由于热双金属组元合金的膨胀系数与温度变化的关系并不呈线性变化，因此热双金属的热敏感性指标——温曲率并不是一个常数，热双金属的弯曲随着温度的升高并不呈线性增加，但在一定温度范围内，热双金属的实际挠度与用温曲率指标算出的挠度相比，变化不超过±5%，在这个范围内热双金属的弯曲变化基本上是线性的，称这个温度范围为线性温度范围。图 4.2-5 是线性温度范围示意图。

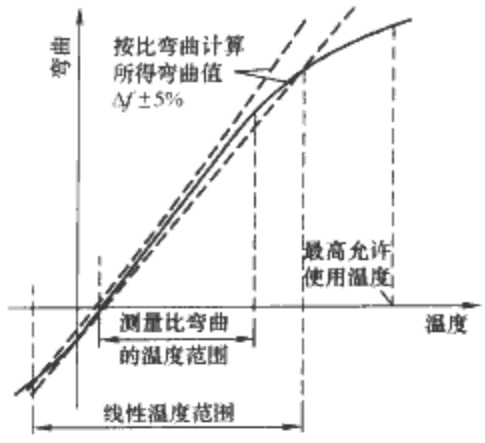


图 4.2-5 线性温度范围示意图

2.4 可用温度范围

该温度范围比线性温度范围大一些，在该温度范围内，自由变形的热双金属不发生残余变形。在超出线性温度范围的允许使用温度范围内，由于热双金属组元材料膨胀系数发生变化，热双金属的热敏感性降低，但仍然可以使用。该温度一般低于材料的居里温度，由于达到居里温度时，材料的结构发生变化，性能也产生变化。

2.5 最高使用温度

最高使用温度即为热双金属发生再结晶的温度。在超过该温度使用时，热双金属组元合金的晶粒将发生再结晶转变，并开始软化，热双金属将不能正常使用。

2.6 弹性模量

弹性模量是指在热双金属弹性极限内，其应力与相应的应变之比。在计算热双金属的机械力和热力时都需要用到弹性模量。其计算公式如下：

$$E = \frac{4PL^3}{\Delta fbh}$$

式中：E 为弹性模量；P 为负载；Δf 为挠度变量；L 为长度；b 为宽度；h 为厚度。

2.7 最大负荷应力

最大负荷应力是指热双金属在使用时，不产生残余变形和永久变形的最大负荷应力。在室温到 200℃ 范围内，大部分热双金属材料的最大负荷应力约为 200N/mm^2。热双金属的最大负荷应力随温度的升高而降低，在使用时需要引起注意。热双金属在温度变化产生热弯曲时引起热应力，受到负载作用时产生机械应力，在制造过程中产生内应力。热应力和机械应力的值可以计算，但在制造过程中产生的内应力值只能估计，因此，尽管有相应的公式，可以针对各种形状和品种的热双金属元件进行设计计算，但在使用前应进行必要的试验以保证安全。

另外，热双金属的性能指标还包括比热容、热导率和密度等。

3 国内外热双金属的相近牌号

各国和各生产厂家的热双金属牌号不尽相同。美国 ASTM B388《热双金属带材》标准中是以字母“TM”(Thermostat Metal) 加上数字代表牌号，如 TM1、TM2 等，其数字只是流水号，没有特别含义。德国 DIN 1715《热双金属带材》标准中是以字母“TB”(Thermostat Bimetal) 加上数字代表牌号，其数字是有物理含义的，前两位数代表乘以 10^{-6} 表示的比弯曲公称值的整数值，后两位代表电阻率公称值的整数值，如 TB1577 等。中国 GB/T 4461《热双金属带材》标准中是以精密合金分类中热双金属代号“5J”加上数字代表牌号，其前两位数代表乘以 10^{-6} 表示的比弯曲公称值的整数值，后两位代表电阻率公称值的整数值，如牌号 5J1480，其比弯曲的值为 14×10^{-6}/℃，电阻率为 80.0μΩ·cm。企业牌号都有各企业的特色，使用户可以通过材料牌号了解到材料的生产商和材料的部分特性。例如佛山精密电工合金有限公司的牌号为 FPA721—110（对应的国标牌号 5J20110），“FPA”是公司热双金属牌号的标记，“721”是主动层材料（Mn72Cu18Ni10）的代号，“110”是该牌号热双金属的电阻率代表值 110μΩ·cm。法国 IMPHY 公司的牌号 8SP，表示属于 SP 系列热双金属，电阻率约为 8μΩ·cm，“SP”系列主动材料是 Mn72Cu18Ni10，被动层材料是 Ni36。

3.1 GB/T 4461—1992《热双金属带材》标准

表 4.2-9 是 GB/T 4461—1992《热双金属带材》标准的牌号及组元合金。表 4.2-10 是 GB/T 4461—1992《热双金属带材》标准的性能参数。

表 4.2-9 GB/T 4461—1992《热双金属带材》标准的牌号及组元合金

牌号	组元层合金牌号			特性	用途
	高膨胀层	中间层	低膨胀层		
5J20110	Mn75Ni15Cu10（Mn72Ni10Cu18）	—	Ni36	高敏感、高电阻、中温用	—
5J14140	Mn75Ni15Cu10（Mn72Ni10Cu18）	—	Ni36	中敏感、高电阻、中温用	—
5J15120	Mn75Ni15Cu10（Mn72Ni10Cu18）	—	Ni45Cr6	中敏感、高电阻、中温用	—
5J1480	Ni22Cr3	—	Ni36	中敏感、中电阻、中温用	—
5J1380	Ni19Mn7	—	Ni34	中敏感、中电阻、低温用	—
5J1580	Ni20Mn6	—	Ni36	中敏感、中电阻、中温用	—
5J1413	Cu62Zn38	—	Ni36	中敏感、低电阻、高导热	适用于制作温度
5J1416	Cu62Zn38	—	Ni36	中敏感、低电阻、高导热	控制、温度补偿
5J1017	Ni	—	Ni36	中敏感、低电阻、中温用	和温度指示装置
5J1070	Ni19Cr11	—	Ni42	中敏感、较高温用	中热敏感元件
5J0756	Ni22Cr3	—	Ni50	低敏感、高温用	—
5J1306A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	电阻系列	—
5J1306B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	电阻系列	—
5J1309A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	电阻系列	—
5J1309B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	电阻系列	—
5J1411A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	电阻系列	—

续表

牌 号	组元层合金牌号			特 性	用 途
	高膨胀层	中间层	低膨胀层		
5J1411B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	电阻系列	—
5J1417A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	电阻系列	—
5J1417B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	电阻系列	—
5J1320A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1320B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1325A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1325B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1430A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1430B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1433A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1433B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1435A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1435B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1440A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1440B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1455A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1455B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列	—
5J1075	Ni16Cr11	—	Ni20Co26Cr8	耐蚀、高强度	—

注 5J20110、5J14140、5J15120 3 个牌号的高膨胀层合金，允许采用括号内的 Mn72Ni10Cu18。

表 4.2-10 GB/T 4461—1992《热双金属带材》标准的性能参数

牌号	比弯曲 K			电阻率 ρ		结合强度试验				参考值				
	标称值 $(10^{-6}℃^{-1})$ $(20^{+5}\sim130^{-5})$	允许偏差(%)		标称值 $(\mu\Omega\cdot cm)$ (20℃±5℃)	允许偏差(%)	Ⅰ	Ⅱ			温曲率 $(10^{-6}℃^{-1})$ (室温～130℃)	线性温度范围 (℃)	允许使用温度范围 (℃)	弹性模量 (MPa) ≥	密度 (g/cm^3)
		Ⅰ级	Ⅱ级			反复弯断	扭转	反复弯曲	弯曲					
5J20110	20.8	±5	±7	113	±5	反复弯曲至断裂，断口处不得有分层现象	不得出现开裂、裂纹	不少于3次，不得出现开裂、裂纹	不得出现开裂、裂纹	39.0	−20～150	−70～200	113 000	7.7
5J14140	14.5			140						27.0	−20～150	−70～200	113 000	7.5
5J15120	15.3			125						28.5	−20～200	−70～250	122 000	7.6
5J1480	14.3			80.0						26.2	−20～180	−70～350	147 000	8.2
5J1380	13.8			80.0						26.2	−50～100	−70～350	147 000	8.1
5J1580	15.0			80.0						28.5	−20～180	−70～350	147 000	8.1
5J1413	14.6			13.0	±10					19.0	−20～180	−70～250	98 000	8.3
5J1416	14.3			16.0						27.2	−20～180	−70～250	98 000	8.3
5J1017	10.0	±8	±10	17.0	±5					26.7	−20～180	−70～400	15 2000	8.4
5J1070	10.8			70.0						20.2	+20～350	−70～500	15 2000	8.0
5J0756	7.8			56.0						14.3	0～400	−70～500	152 000	8.2
5J1306A	13.8	±5	±7	6.0	±10					26.0	−20～150	−70～200	122 000	8.3
5J1306B	13.5			6.0						25.4	−20～150	−70～200	122 000	8.3
5J1309A	13.9			9.0						26.2	−20～150	−70～200	122 000	8.2
5J1309B	13.6			9.0						25.6	−20～150	−70～200	122 000	8.2
5J1411A	14.9			11.0						27.6	−20～150	70～200	122 000	8.2
5J1411B	14.2			11.0						26.5	−20～150	−70～200	122 000	8.2
5J1417A	14.9			17.0						27.6	−20～150	−70～200	122 000	8.2
5J1417B	14.2			17.0						26.5	−20～150	−70～200	122 000	8.2
5J1320A	13.3			20.0	±8					23.4	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1320B	13.0			20.0						22.9	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1325A	13.9			25.0						26.1	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1325B	13.5			25.0						25.4	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1430A	14.8			30.0	±7					27.5	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1430B	14.0			30.0						26.2	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1433A	14.8			33.0						27.5	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1433B	14.0			33.0						26.2	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1435A	14.8			35.0						27.5	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1435B	14.0			35						26.2	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1440A	14.8			40.0						27.5	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1440B	14.0			40.0						26.2	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1455A	14.9			55.0						27.5	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1455B	14.1			55.0						26.3	−20～150	−70～200	152 000	8.2
5J1075	10.8	±8	±10	75.0	±5					20.4	−20～200	−70～550	166 000	8.0

注 5J1380 的比弯曲 K 值为室温～100℃的测试数据。

3.2 美国 ASTM B388—2000《热双金属带材》标准

表 4.2-11 是美国 ASTM B388—2000《热双金属带材》标准的牌号和性能参数。

3.3 德国 DIN 1715《热双金属带材》标准

表 4.2-12 是德国 DIN 1715—1983《热双金属带材》标准的牌号和性能参数。表 4.2-13 是德国 DIN 1715—1983《热双金属带材》标准的牌号组元及性能。

3.4 佛山精密电工合金有限公司（FEPAC）热双金属带材部分牌号的性能参数

佛山精密电工合金有限公司是目前国内最大的热双金属生产企业，表 4.2-14 是佛山精密电工合金有限公司热双金属带材部分牌号的性能参数。

3.5 法国 IMPHY 公司部分热双金属带材的性能

表 4.2-15 是法国 IMPHY 公司部分热双金属带材的性能参数。表 4.2-16 是法国 IMPHY 公司部分热双金属带材的组元合金。

表 4.2-11　　美国 ASTM B388—2000《热双金属带材》标准的牌号和性能参数

性　能	单位	ASTM 牌号					
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
最大敏感温度范围	℃	−18～149	−18～204	93～316	121～371	149～454	38～288
最高使用温度	℃	538	260	538	538	538	538
温曲率(10～93℃)		27.0±5%	38.7±5%	18.7±6%	15.1±6%	11.3±6%	23.2±8%
温曲率(38～149℃)	$\times10^{-6}$	26.3±5%	38.0±5%	19.1±6%	15.5±6%	11.5±6%	23.2±8%
热处理温度	℃	371	260	371	371	371	371
电阻率	μΩ·m	0.790±4%	1.12±5%	0.732±4%	0.665±4%	0.582±5%	0.732±4%
弹性模量	MPa	172 000	138 000	172 000	172 000	176 000	172 000
密度	kg/m³	8030	7750	8030	8030	8030	8030
主动层材料		Ni22Cr3	Mn72Cu18Ni10	Ni25Cr8	Ni25Cr8	Ni25Cr8	Ni22Cr3
主动层厚度比例	%	50	53	50	50	50	50
中间层材料		—	—	—	—	—	—
中间层厚度比例	%	—	—	—	—	—	—
被动层材料		Ni36	Ni36	Ni42	Ni45	Ni50	Ni40
被动层厚度比例	%	50	47	50	50	50	50

性　能	单位	ASTM 牌号					
		TM7	TM8	TM9	TM10	TM11	TM12
最大敏感温度范围	℃	−18～149	−18～204	−18～149	−18～149	−18～149	−18～149
最高使用温度	℃	482	260	482	482	482	482
温曲率(10～93℃)		26.1±7%	28.6±8%	20.7±10%	23.6±6%	24.7±6%	25.4±5.5%
温曲率(38～149℃)	$\times10^{-6}$	26.1±7%	28.6±8%	20.2±10%	22.9±6%	23.9±6%	24.7±5.5%
热处理温度	℃	371	260	371	371	371	371
电阻率	μΩ·m	0.931±4%	1.41±5%	0.166±5.5%	0.208±5.5%	0.249±5.5%	0.291±5.5%
弹性模量	MPa	165 000	134 000	179 000	179 000	179 000	176 000
密度	kg/m³	7750	7470	8580	8300	8300	8300
主动层材料		Ni14Mn9Al5	Mn72Cu18Ni10	Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni22Cr3
主动层厚度比例	%	50	80	27	34	36	40
中间层材料		—	—	Ni	Ni	Ni	Ni
中间层厚度比例	%	—	—	46	32	28	20
被动层材料		Ni36	Ni36	Ni36	Ni36	Ni36	Ni36
被动层厚度比例	%	50	20	27	34	36	40

性　能	单位	ASTM 牌号					
		TM13	TM14	TM15	TM16	TM17	TM18
最大敏感温度范围	℃	−18～149	−18～149	−18～149	−18～149	−18～149	93～316
最高使用温度	℃	482	482	482	482	482	482
温曲率(10～93℃)		25.9±5.5%	26.5±5.5%	26.5±5.5%	27.0±5.5%	27.0±55.%	21.6±7%
温曲率(38～149℃)	$\times10^{-6}$	25.2±5.5%	25.7±5.5%	25.9±5.5%	26.1±5.5%	26.3±5.5%	21.6±7%
热处理温度	℃	371	371	371	371	371	371
电阻率	μΩ·m	0.332±5.5%	0.416±5.5%	0.499±5.5%	0.582±5.5%	0.665±5.5%	0.698±4%
弹性模量	MPa	176 000	176 000	172 000	172 000	172 000	172 000
密度	kg/m³	8300	8300	8300	8030	8030	8030
主动层材料		Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni19Cr2
主动层厚度比例	%	42	44	47	48	49	50
中间层材料		Ni	Ni	Ni	Ni	Ni	—
中间层厚度比例	%	16	12	6	4	2	—
被动层材料		Ni36	Ni36	Ni36	Ni36	Ni36	Ni42
被动层厚度比例	%	42	44	47	48	49	50

续表

性能	单位	ASTM 牌号					
		TM19	TM20	TM21	TM22	TM23	TM24
最大敏感温度范围	℃	65～232	−18～149	93～316	−18～149	93～316	−18～149
最高使用温度	℃	482	482	482	482	260	260
温曲率(10～93℃)		25.7±7%	25.0±5%	20.3±7%	18.4±5%	33.3±5%	23.0±4%
温曲率(38～149℃)	$\times10^{-6}$	25.4±7%	25.0±5%	20.3±7%	18.4±5%	33.3±5%	22.7±10%
热处理温度	℃	371	371	371	371	260	260
电阻率	μΩ·m	0.758±5%	0.785±4%	0.715±4%	0.153±4%	0.939±4%	0.033 3±10%
弹性模量	MPa	172 000	172 000	172 000	179 000	138 000	165 000
密度	kg/m^3	8030	8030	8030	8580	7750	8030
主动层材料		Ni19Cr2	Ni18Cr11	Ni18Cr11	Ni	Mn72Cu18Ni10	Ni22Cr3
主动层厚度比例	%	50	50	50	50	54	10
中间层材料		—	—	—	—	—	Cu
中间层厚度比例	%	—	—	—	—	—	53
被动层材料		Ni39	Ni36	Ni42	Ni36	Ni42	Ni36
被动层厚度比例	%	50	50	50	50	46	37

性能	单位	ASTM 牌号					
		TM25	TM26	TM27	TM28	TM29	TM30
最大敏感温度范围	℃	−18～149	−18～149	−18～149	−18～149	−18～149	93～316
最高使用温度	℃	260	260	260	260	538	538
温曲率(10～93℃)		25.0±4%	26.3±4%	26.5±4%	26.6±4%	28.44±4%	21.24±6%
温曲率(38～149℃)	$\times10^{-6}$	24.3±7.5%	25.7±7.5%	26.7±7.5%	26.3±5%	28.08±4%	21.96±6%
热处理温度	℃	260	260	260	260	371	371
电阻率	μΩ·m	0.050±7.5%	0.083±7.5%	0.116±7.5%	0.150±5%	0.793±4%	0.690±4%
弹性模量	MPa	165 000	158 000	158 000	151 000	172 000	172 000
密度	kg/m^3	8030	8030	8030	8030	8030	8030
主动层材料		Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni22Cr3	Ni20Mn6	Ni22Cr3
主动层厚度比例	%	20	31	38	42	50	50
中间层材料		Cu	Cu	Cu	Cu	—	—
中间层厚度比例	%	35	20	14	10	—	—
被动层材料		Ni36	Ni36	Ni36	Ni36	Ni36	Ni42
被动层厚度比例	%	45	49	48	48	50	50

表 4.2-12　　德国 DIN 1715—1983《热双金属带材》标准的牌号和性能参数

牌号	温曲率(%)(20～130℃)	比弯曲(20～130℃)	线性温度范围(℃)	上限使用温度(℃)	电阻率(μΩ·m)(20℃)	弹性模量(kN/mm^2)(20℃)	密度(kg/dm^3)(20℃)	比热容[J/(g·K)](20℃)
TB20110	39.0±5	20.8	−20～200	350	1.10±5%	135	7.8	0.46
TB1577A	28.5±5	15.5	−20～200	450	0.78±5%	170	8.1	0.46
TB1577B								
TB1170A	22.0±5	11.7	−20～380	450	0.70±5%	170	8.1	0.46
TB1170B								
TB1075	20.0±5	10.8	−20～200	550	0.75±5%	200	8.0	0.46
TB0965	18.6±5	9.8	−20～425	450	0.65±5%	175	8.2	0.46
TB1555	28.2±5	15.0	−20～200	450	0.55±5%	170	8.2	0.46
TB1435	27.4±5	14.8	−20～200	450	0.35±5%	170	8.3	0.46
TB1425	26.1±5	14.0	−20～200	450	0.25±7%	170	8.3	0.44
TB1511	27.8±5	15.0	−20～200	400	0.11±10%	165	8.3	0.44
TB1109	21.6±5	11.5	−20～380	400	0.09±10%	165	8.2	0.46

表 4.2-13 德国 DIN 1715—1983《热双金属带材》标准的牌号组元及性能

牌　号	主动层材料	中间层材料	被动层材料	热导率[W/(m·K)] (20℃)	允许应力(N/mm²) (20℃)
TB20110	MnCu18～10Ni10～16	—	Ni36	6	200
TB1577A	Ni20Mn6	—	Ni36	13	200
TB1577B	X60Ni14Mn7	—	Ni36	13	250
TB1170A	Ni20Mn6	—	Ni42	13	200
TB1170B	X60Ni14Mn7	—	Ni42	13	250
TB1075	Ni16Cr11	—	Co26Ni20Cr8	19	250
TB0965	Ni20Mn6	—	Ni46	15	200
TB1555	Ni20Mn6	Ni	Ni36	16	200
TB1435	Ni20Mn6	Ni	Ni36	22	200
TB1425	Ni20Mn6	Ni	Ni36	28	200
TB1511	Ni20Mn6	Cu	Ni36	70	200
TB1109	Ni20Mn6	Cu	Ni42	88	200

表 4.2-14 佛山精密电工合金有限公司热双金属带材部分牌号的性能参数

牌　号	温曲率 K ($10^{-6}℃^{-1}$) (20～130℃)	比弯曲 A ($10^{-6}℃^{-1}$)	线性温度范围 (℃)	可用温度范围 (℃)	最高使用温度 (℃)	电阻率 (μΩ·m)	密　度 (g/cm³) (20℃时)	弹性模量 (10^5N/mm²) (20℃时)
FPA N—16	18.41±5%	9.7	−20～150	−70～260	480	15.3±6%	8.58	1.79
FPA 27—93	26.1±7%	13.7	−20～150	−70～370	480	93.1±4%	7.75	1.65
FPA 27—108	33.3±5%	17.6	−20～150	−70～260	260	108±4%	8.03	1.38
FPA 181—70	20.3±6.6%	9.9	+90～320	−70～540	480	71.5±4%	8.03	1.72
FPA 181—80	25.0±5%	13.3	−20～150	−70～370	480	78.5±4%	8.03	1.72
FPA 192—70	21.6±6.6%	11.7	+90～320	−70～430	480	69.8±4%	8.03	1.72
FPA 192—75	25.7±7%	13.7	+70～230	−70～480	480	75.8±4%	8.03	1.72
FPA 192—80	27.7±4%	14.7	−20～150	−70～370	480	80.3±4%	8.03	1.72
FPA 223—16	8.28±4%	4.4	−20～150	−70～370	370	15.8±6%	8.58	1.97
FPA 223—17	20.7±6%	10.8	−20～150	−70～370	480	16.6±5%	8.30	1.79
FPA 223—21	23.6±4%	12.3	−20～150	−70～370	480	20.8±5.5%	8.30	1.79
FPA 223—25	24.7±4%	13.1	−20～150	−70～370	480	24.9±5.5%	8.30	1.79
FPA 223—30	25.4±4%	13.5	−20～150	−70～370	480	29.1±5.5%	8.30	1.76
FPA 223—35	25.9±4%	13.7	−20～150	−70～370	480	33.2±5.5%	8.03	1.76
FPA 223—40	26.5±4%	14.0	−20～150	−70～370	480	41.6±5.5%	8.03	1.76
FPA 223—50	26.6±5%	14.2	−20～150	−70～370	480	49.9±5.5%	8.03	1.72
FPA 223—60	27.0±5%	14.2	−20～150	−70～370	480	58.2±5.5%	8.03	1.72
FPA 223—65	27.0±5%	14.2	−20～150	−70～370	480	66.5±5.5%	8.03	1.72
FPA 223—70	21.6±5%	11.4	+90～320	−70～540	540	69.0±4%	8.03	1.72
FPA 223—75	25.2±4%	13.4	+70～230	−70～540	480	75.1±4%	8.03	1.72
FPA 223—80	27.0±4%	14.3	−20～150	−70～370	540	79.0±4%	8.03	1.72
FPA 258—60	11.3±6%	5.7	+150～430	−70～540	540	58.2±5%	8.03	1.76
FPA 258—70	15.1±6%	7.6	+120～370	−70～540	540	66.5±4%	8.03	1.72
FPA 258—75	18.7±6%	9.5	+90～320	−70～540	540	73.2±4%	8.03	1.72
FPA 258—85	24.8±6%	13.2	−20～150	−70～370	540	83.1±4%	8.03	1.72
FPA 703—12	27.0±4%	14.3	−20～150	−70～180	180	12.3±8%	8.30	1.24
FPA 721—5	33.9±4%	17.9	−20～200	−70～260	260	5.0±10%	8.30	1.38
FPA 721—6	35.6±4%	18.8	−20～200	−70～260	260	5.8±8%	8.30	1.38
FPA 721—8	37.3±4%	19.7	−20～200	−70～260	260	8.3±7.5%	8.03	1.38
FPA 721—7	36.2±4%	19.1	−20～200	−70～260	260	6.6±7.5%	8.03	1.38
FPA 721—10	37.8±4%	21.0	−20～200	−70～260	260	10.0±7.5%	8.03	1.38

续表

牌 号	温曲率 K ($10^{-6}℃^{-1}$) (20～130℃)	比弯曲 A ($10^{-6}℃^{-1}$)	线性温度范围 (℃)	可用温度范围 (℃)	最高使用温度 (℃)	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$)	密 度 (g/cm^3) (20℃时)	弹性模量 ($10^5 N/mm^2$) (20℃时)
FPA 721—12	38.0±4%	21.1	−20～200	−70～260	260	11.6±7.5%	8.03	1.38
FPA 721—15	38.3±4%	21.3	−20～200	−70～260	260	15.0±6%	8.03	1.38
FPA 721—17	38.5±4%	21.4	−20～200	−70～260	260	16.6±6%	8.03	1.38
FPA 721—20	38.7±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	20.8±6%	8.03	1.38
FPA 721—25	38.7±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	24.9±6%	7.75	1.38
FPA 721—30	38.7±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	29.1±6%	7.75	1.38
FPA 721—35	38.7±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	33.2±6%	7.75	1.38
FPA 721—40	38.7±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	41.6±6%	7.75	1.38
FPA 721—50	38.7±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	49.9±5%	7.75	1.38
FPA 721—60	38.7±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	58.2±5%	7.75	1.38
FPA 721—70	38.7±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	66.5±5%	7.75	1.38
FPA 721—95	33.3±4%	20.5	+90～320	−70～320	430	93.9±4%	7.75	1.38
FPA 721—110	39.4±4%	20.5	−20～200	−70～260	260	112.2±4%	7.75	1.38
FPA 721—140	28.6±4%	14.3	−20～200	−70～260	260	141.3±4%	7.47	1.34
FPA 925—16	10.1±4%	5.3	−20～330	−70～260	330	17.6±15%	8.30	1.52
FPA 925—18	24.1±4%	12.8	−20～150	−70～260	330	18.3±15%	8.58	1.31
FPA 982—2	12.0±4%	6.7	−20～150	−70～260	260	2.5±10%	8.86	1.38
FPA 982—3	23.0±4%	12.2	−20～150	−70～260	260	3.3±10%	8.58	1.38
FPA 982—4	24.3±4%	12.9	−20～150	−70～260	260	4.2±10%	8.58	1.52
FPA 982—5	25.0±4%	13.3	−20～150	−70～260	260	5.0±7.5%	8.30	1.59
FPA 982—6	25.6±4%	13.5	−20～150	−70～260	260	5.8±7.5%	8.30	1.62
FPA 982—7	25.9±4%	13.7	−20～150	−70～260	260	6.6±7.5%	8.30	1.65
FPA 982—8	26.3±4%	13.9	−20～150	−70～260	260	8.3±7.5%	8.30	1.65
FPA 982—9	26.3±4%	13.9	−20～150	−70～260	260	9.0±7.5%	8.30	1.69
FPA 982—11	26.0±4%	14.0	−20～150	−70～260	370	11.0±7.5%	8.30	1.69
FPA 982—15	26.6±4%	14.1	−20～150	−70～260	370	15.0±5%	8.30	1.72
FPA 982—17	26.6±4%	14.1	−20～150	−70～260	370	16.6±5%	8.30	1.72
FPA 982—21	26.6±4%	14.1	−20～150	−70～260	370	20.8±5%	8.30	1.72
FPA 206—6	26.9±5%	14.5	−20～150	−70～200	400	6.0±10%	8.30	1.65
FPA 206—6A	26.0±4%	13.8	−20～150	−70～200	400	5.84±7%	8.30	1.65
FPA 206—9	21.8±5%	11.5	−20～380	−70～380	400	9.0±5%	8.20	1.65
FPA 206—9A	27.0±4%	14.32	−20～150	−70～200	400	9.0±7%	8.20	1.65
FPA 206—10	25.0±4%	13.4	−20～325	−20～350	400	9.0±7%	8.20	1.70
FPA 206—11	27.6±4%	14.9	−20～150	−70～200	400	10.5±7%	8.20	1.65
FPA 206—15	28.1±5%	15.0	−20～150	−70～200	400	15.0±7%	8.20	1.65
FPA 206—17	27.6±4%	14.9	−20～150	−70～200	400	17.0±10%	8.20	1.65
FPA 206—20	23.4±4%	13.3	−20～150	−70～200	450	20.0±8%	8.20	1.85
FPA 206—21	11.3±4%	6.0	−20～450	−20～450	450	21.0±10%	8.00	1.90
FPA 206—25	26.1±4%	13.9	−20～150	−70～200	450	25.0±8%	8.20	1.85
FPA 206—30	27.5±4%	14.8	−20～150	−70～200	450	30.0±7%	8.20	1.85
FPA 206—35	27.5±4%	14.8	−20～150	−70～200	450	35.0±7%	8.20	1.85
FPA 206—40	27.5±4%	14.8	−20～150	−70～200	450	40.0±7%	8.20	1.85
FPA 206—55	27.6±5%	14.9	−20～150	−70～200	450	55.0±7%	8.20	1.85
FPA 206—70	22.9±5%	11.7	−20～380	−70～450	450	70.0±5%	8.10	1.70
FPA 206—78	28.5±4%	15.5	−20～200	−70～350	450	78.0±5%	8.10	1.70
FPA 197—78	26.2±4%	13.8	−50～100	−80～350	450	80.0±5%	8.10	1.80
FPA L2—40	25.6±4%					41.5±5%		
FPA 223—69	19.0±5%	9.9	+90～320	−70～540	540	71.5±4%	8.03	1.72

表 4.2-15 法国 IMPHY 公司部分热双金属带材的性能参数

牌号	温曲率 K ($10^{-6}K^{-1}$)	比弯曲 A ($10^{-6}K^{-1}$)	线性温度范围 (℃)	上限使用温度 (℃)	稳定化温度 (℃/2h)	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$)	密度 (g/cm^3) (20℃时)	弹性模量 (N/mm^2) (20℃时)	最大允许应力 (N/mm^2) (20℃时)	热导率 [W/(m·K)] (20℃时)	比热容 [J/(g·K)] (20℃时)
108SP	39.0±4%	20.8	−20～+200	350	250	1.10±4%	7.6	135 000	200	6	0.46
140SP	28.6±5%	15.5	−20～+200	350	250	1.40±5%	7.4	134 000	150	6	0.46
60SP	38.5±4%	20.5	−20～+200	350	250	0.58±5%	7.8	135 000	200	12	0.46
40SP	38.5±4%	20.5	−20～+200	350	250	0.40±4%	7.8	135 000	200	20	0.46
20SP	38.5±4%	20.5	−20～+200	350	250	0.208±7%	7.8	135 000	200	40	0.46
15SP	38.2±4%	20.4	−20～+200	350	250	0.15±7%	7.8	135 000	200	54	0.46
11SP	38.2±4%	20.4	−20～+200	350	250	0.115±7%	7.9	135 000	200	71	0.46
8SP	38.0±4%	20.2	−20～+200	350	250	0.082±9%	8.0	135 000	200	104	0.46
5SP	33.8±4%	17.9	−20～+200	350	250	0.048±9%	8.2	135 000	150	155	0.46
AS	28.5±4%	15.5	−20～+200	450	350	0.78±5%	8.1	170 000	200	13	0.46
AS55	28.2±4%	15.0	−20～+200	450	350	0.55±5%	8.2	170 000	200	16	0.46
AS35	27.4±4%	14.8	−20～+200	450	350	0.35±5%	8.3	170 000	200	22	0.46
AS25	26.1±4%	14.0	−20～+200	450	350	0.25±5%	8.3	170 000	200	28	0.44
AS11	27.8±4%	15.0	−20～+200	400	250	0.11±7%	8.2	165 000	200	70	0.44
AS6	26.9±4%	14.5	−20～+200	400	250	0.06±7%	8.4	160 000	150	130	0.44
R80	26.5±4%	14.3	−20～+200	450	350	0.79±4%	8.1	172 000	200	12	0.46
R40	26.1±4%	13.9	−20～+200	450	350	0.42±5%	8.2	176 000	200	20	0.46
R25	24.2±4%	12.9	−20～+200	450	350	0.25±5%	8.4	179 000	200	28	0.45
R16	26.5±4%	14.2	−20～+200	350	250	0.168±7%	8.3	170 000	200	40	0.45
R15	18.5±4%	9.8	−20～+200	450	350	0.158±6%	8.5	179 000	150	55	0.45
R11	26.1±4%	14.0	−20～+175	350	250	0.115±7%	8.2	168 000	200	70	0.44
R8	26.1±4%	13.9	−20～+175	350	250	0.081±7%	8.3	166 000	200	100	0.44
R6	25.5±4%	13.5	−20～+175	350	250	0.058±7%	8.4	164 000	150	135	0.44
R4	24.7±4%	13.0	−20～+175	350	250	0.041±7%	8.5	150 000	150	180	0.42
BS	22.0±4%	11.7	−20～+380	450	350	0.70±4%	8.1	170 000	200	13	0.46
BS9	21.8±4%	11.6	−20～+380	400	250	0.09±5%	8.2	165 000	200	88	0.46
BSP	33.0±4%	17.5	−20～+380	400	250	1.05±5%	7.5	138 000	200	7	0.46
IN450	18.5±4%	10.0	−20～+200	500	400	0.85±5%	8.1	185 000	250	12	0.46

表 4.2-16 法国 IMPHY 公司部分热双金属带材的组元合金

主动层组元	被动层组元	
	因瓦(Ni36Fe) [(−20～+200)℃]	N42(Ni42Fe) [(−20～+380)℃]
B72M (Mn72Cu18Ni10)	108SP 140SP +Ni=60SP－40SP +Cu=20SP－15SP－11SP 8SP－5SP	BSP
B6M (Ni20Mn6Fe)	AS +Ni=AS55－AS35－AS25 +Cu=AS11－AS6	BS +Cu=BS9
NC4 (Ni22Cr3Fe)	R80 +Ni=R40－R25 +Cu=R16－R11－ R8－R6－R4	
Ni	R15	

3.6 日本 SUMITOMO 公司部分热双金属带材的性能

表 4.2-17 是日本 SUMITOMO 公司部分热双金属带材性能。

3.7 美国 PMC 公司部分热双金属带材的性能

表 4.2-18 是美国 PMC 公司部分热双金属带材性能。

3.8 美国 TI 公司部分热双金属带材的性能

表 4.2-19 是美国 TI 公司部分热双金属带材性能表。

3.9 国内外部分热双金属牌号对照

不同公司生产的热双金属带材性能存在差异，但有一部分牌号的性能是相近的。表 4.2-20 汇集了部分厂家性能相近的热双金属对应牌号，以供参考。大家在选用时，应注意比较其温曲率、电阻率和材料的线性及使用温度范围。

表 4.2-17 日本 SUMITOMO 公司部分热双金属带材性能

分 类	牌 号	弯曲系数 K ($10^{-6}℃^{-1}$)（室温～100℃）	线性温度范围（℃）	可用温度范围（℃）	稳定化温度（℃/h）	电阻率（$\mu\Omega \cdot m$）（20℃时）	密度（g/cm^3）（20℃时）	弹性模量（N/mm^2）20℃时
低温用双金属	BL—1	14.0±0.7	−20～+150	−70～+180	180	12.0±1.0	8.25	108 000
	BL—2	15.0±0.7	−20～+150	−70～+350	350	81.0±4.0	8.05	167 000
	BL—3	9.2±0.5	−20～+150	−70～+350	350	17.0±0.9	8.4	176 000
	BL—4	14.5±0.7	−20～+150	−70～+350	350	80.0±4.0	8.2	167 000
	BL—5	13.8±0.7	−20～+150	−20～+350	350	78.0±3.9	8.0	167 000
	BL—51	14.4±0.7	−20～+150	−70～+350	350	78.0±3.9	8.1	167 000
中温用双金属	BM—1	14.3±0.7	−20～+250	−70～+350	350	76.0±3.8	8.2	167 000
高温用双金属	BH—1	10.9±0.5	20～+350	−70～+500	500	72.0±3.6	8.25	167 000
	BH—2	11.5±0.6	20～+350	−70～+500	500	70.0±3.5	8.0	157 000
	BH—3	7.0±0.4	50～+430	−70～+500	500	57.0±2.9	8.3	157 000
	BH—7	6.0±0.3	−20～+430	−70～+540	540	68.0±3.4	8.0	191 000
高电阻双金属	BR—1	20.0±1.0	−20～+150	−70～+200	200	110.0±5.5	7.7	127 000
	BR—2	14.8±0.7	−20～+150	−70～+200	200	140.0±7.0	7.5	127 000
	NC. BR—1	17.5±0.9	−20～+150	−70～+200	200	105.0±6.0	7.7	123 000
	NC. BR—2	13.5±0.7	−20～+150	−70～+200	200	135.0±7.0	7.55	123 000
低电阻三金属	TRC—5	12.8±0.6	−20～+150	−70～+400	400	4.2±0.4	8.45	147 000
	TRC—05	10.7±0.7	−20～+150	−70～+400	400	4.1±0.4	8.45	157 000
	TRC—10	13.8±0.7	−20～+150	−70～+400	400	8.3±0.8	8.25	157 000
	TRC—12	13.8±0.7	−20～+150	−70～+400	400	12.0±1.2	8.2	157 000
	TRC—15	13.8±0.7	−20～+150	−70～+400	400	15.0±1.5	8.2	157 000
	TRC—15K	14.5±0.7	−20～+150	−70～+400	400	15.0±1.5	8.15	162 000
	TRC—15R	13.5±0.7	−20～+150	−70～+350	350	15.0±0.8	8.35	157 000
中电阻三金属	TR—15	10.5±0.7	−20～+150	−70～+350	350	17.0±0.9	8.6	162 000
	TR—20	12.0±0.6	−20～+150	−70～+350	350	21.0±1.1	8.4	162 000
	TR—25	13.5±0.7	−20～+150	−70～+350	350	25.0±1.3	8.3	162 000
	TR—30	13.8±0.7	−20～+150	−70～+350	350	29.0±1.5	8.3	162 000
	TR—35	14.0±0.7	−20～+150	−70～+350	350	33.0±1.7	8.2	162 000
	TR—40	14.5±0.7	−20～+150	−70～+350	350	42.0±2.1	8.2	162 000
	TR—50	14.5±0.7	−20～+150	−70～+350	350	50.0±2.5	8.15	162 000
	TR—60	14.5±0.7	−20～+150	−70～+350	350	58.0±2.9	8.15	162 000
	TR—65	14.5±0.7	−20～+150	−70～+350	350	67.0±3.4	8.1	162 000
高电阻三金属	TR—95	14.7±0.7	−20～+150	−70～+250	250	95.0±5.0	—	147 000
	TR—110	13.3±0.7	−20～+150	−70～+250	250	113.0±6.0	7.6	147 000
高电阻三金属	BRC—6	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	6.5±0.5	8.05	123 000
	BRC—8	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	8.6±0.6	8.0	123 000
	BRC—13	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	13.0±1.0	7.9	123 000
	BRC—22	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	22.0±1.3	7.9	123 000
	BRC—27	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	27.5±1.6	7.9	123 000
	BRC—32	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	32.0±1.6	7.9	123 000
	BRC—47	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	47.0±2.3	7.9	123 000
	BRC—61	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	61.0±3.1	7.9	123 000
	BRC—83	19.6±1.0	−20～+150	−70～+200	200	83.0±4.2	7.9	123 000
耐腐蚀双金属	BMS	12.2±0.6	−20～+250	−70～+350	350	76.0±4.0	8.05	186 000
	BH—2S	10.3±0.6	20～+350	−70～+500	500	70.0±4.0	8.0	186 000
	BSS	9.5±0.5	−20～+150	−70～+350	350	85.0±4.3	8.0	176 000
特殊复合金属	ALBL2	14.8±0.8	−20～+150	−70～+350	350	43.0±8.0	8.0	—
	ZnBL2	14.8±0.8	−20～+150	−70～+300	300	52.0±8.0	8.05	—

表 4.2-18 美国 PMC 公司部分热双金属带材性能

牌号	温曲率(10^{-7}℉$^{-1}$)		电阻率	线性温度	弹性模量	密度	维氏硬度范围		
	50～200℉	100～300℉	(Ω·mm²/m)	(℃)	(10^5MPa)	(g/cm³)	变形量	主动层	被动层
N—1	102±4.9%	101	0.158±6%	−18～149	1.79	8.58	50%	180～230	210～260
27—1	185±4.9%	185	1.080±4%	−18～149	1.38	7.75	50%	260～310	210～260
27—560	145±6.9%	145	0.932±4%	−18～149	1.65	7.75	50%	260～310	210～260
181—1	139±5%	139	0.786±4%	−18～149	1.72	8.03	40%	295～345	205～255
181—3	106±6.6%	109	0.716±4%	93～316	1.72	8.03	40%	295～345	210～260
192—1	154±3.9%	151	0.804±4%	−18～149	1.72	8.03	40%	320～370	205～225
192—3	120±6.6%	120	0.699±4%	93～316	1.72	8.03	40%	320～370	210～260
192—11	143±7%	141	0.786±4%	65～232	1.72	8.03	40%	320～370	195～245
223—1	150.5±5%	146	0.790±4%	−18～149	1.72	8.03	50%	260～310	210～260
223—3	112±3.6%	122	0.691±4%	93～316	1.72	8.03	50%	260～310	215～265
223—11	140±4.3%	141	0.752±4%	65～232	1.72	8.30	50%	260～310	200～260
223—N	46±4.3%	47	0.159±6%	−18～149	1.97	8.58	50%	260～310	180～230
223—100	112±6.3%	105	0.167±5%	−18～149	1.79	8.30	50%	260～310	210～260
223—125	124±5.6%	127	0.208±5%	−18～149	1.79	8.30	50%	260～310	210～260
223—150	135±5.2%	133	0.250±5.5%	−18～149	1.79	8.30	50%	260～310	210～260
223—175	138±5.8%	137	0.291±5.5%	−18～149	1.76	8.30	50%	260～310	210～260
223—200	140±5.7%	140	0.333±5.5%	−18～149	1.76	8.30	50%	260～310	210～260
223—250	147±5.4%	143	0.416±5.5%	−18～149	1.76	8.30	50%	260～310	210～260
223—300	149±5.4%	144	0.500±5.5%	−18～149	1.72	8.30	50%	260～310	210～260
223—350	150±5.3%	145	0.582±5.5%	−18～149	1.72	8.03	50%	260～310	210～260
223—400	150±5.3%	146	0.666±5.5%	−18～149	1.72	8.03	50%	260～310	210～260
258—1	138±5.8%	136	0.832±4%	−18～149	1.72	8.03	40%	220～280	205～255
258—3	104±5.8%	106	0.732±4%	93～316	1.72	8.03	40%	220～280	210～260
258—4	84±6%	86	0.675±4%	121～371	1.72	8.03	40%	220～280	200～250
258—5	63±6.3%	64	0.599±5%	149～454	1.76	8.03	40%	220～280	210～260
703—1	150±10%	150	0.124±15%	−18～149	1.24	8.30	40%	160～210	205～255
721—3	180±5%	180	0.939±4%	93～316	1.38	7.75	50%	190～240	215～265
721—30	188±4.3%	188	0.050±10%	−18～204	1.38	8.30	50%	190～240	210～260
721—35	198±4%	190	0.059±8%	−18～204	1.38	8.30	50%	190～240	210～260
721—40	201±4%	196	0.067±7.5%	−18～204	1.38	8.30	50%	190～240	210～260
721—50	207±3.9%	250	0.083±7.5%	−18～204	1.38	8.30	50%	190～240	210～260
721—60	210±3.8%	200	0.100±7.5%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—70	211±3.8%	202	0.117±7.5%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—90	213±4.2%	204	0.150±6%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—100	214±4.2%	205	0.166±6%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—125	215±4.2%	209	0.210±6%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—150	215±4.2%	209	0.250±6%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—175	215±4.2%	209	0.292±6%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—200	215±4.2%	209	0.333±6%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—250	215±4.2%	209	0.416±6%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—300	215±4.2%	209	0.499±5%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—350	215±4.2%	209	0.582±5.5%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—400	215±4.2%	209	0.666±5%	−18～204	1.38	8.03	50%	190～240	210～260
721—675	215±5.1%	209	1.123±4%	−18～204	1.38	7.75	50%	190～240	210～260
721—850	159±8.2%	159	1.414±4%	−18～204	1.34	7.47	50%	190～240	210～260
925—1	134±3.7%	133	0.183±15%	−18～149	1.31	8.58	50%	140～190	205～255

续表

牌 号	温曲率(10^{-7}°F^{-1})		电阻率 (Ω · mm²/m)	线性温度 (℃)	弹性模量 (10^5MPa)	密 度 (g/cm³)	维氏硬度范围		
	50～200°F	100～300°F					变形量	主动层	被动层
925—17	56±3.6%	56	0.177±15%	−18～330	1.52	8.30	50%	140～190	215～265
982—15	70±4.3%	69	0.025±10%	−18～149	1.38	8.86	50%	260～310	210～260
982—20	128±3.9%	125	0.034±10%	−18～149	1.38	8.58	50%	260～310	210～260
982—25	135±3.7%	130	0.042±10%	−18～149	1.52	8.58	50%	260～310	210～260
982—30	139±4.3%	133	0.050±7.5%	−18～149	1.59	8.30	50%	260～310	210～260
982—35	142±4.2%	135	0.059±7.5%	−18～149	1.62	8.30	50%	260～310	210～260
982—40	144±4.2%	138	0.067±7.5%	−18～149	1.65	8.30	50%	260～310	210～260
982—50	146±4.1%	141	0.083±7.5%	−18～149	1.65	8.30	50%	260～310	210～260
982—60	146±4.1%	142	0.100±7.5%	−18～149	1.69	8.30	50%	260～310	210～260
982—70	147±4.1%	144	0.117±7%	−18～149	1.69	8.30	50%	260～310	210～260
982—90	148±4.1%	144	0.150±5%	−18～149	1.72	8.30	50%	260～310	210～260
982—100	148±4.1%	144	0.166±5%	−18～149	1.72	8.30	50%	260～310	210～260
982—125	148±4.1%	145	0.208±5%	−18～149	1.72	8.30	50%	260～310	210～260

注 温曲率从华氏温度单位(°F)向摄氏温度单位转换只需乘系数 1.8 进行换算。

表 4.2-19 美国 TI 公司部分热双金属带材性能表

牌 号	温曲率 (10^{-7}°F^{-1}) (50～200°F)	最大敏感温度范围 (°F)	有效偏转温度范围 (°F)	推荐最大温度 (°F)	弹性模量 (10^6lbs/sq. in.)	电阻率 (Ω · cm/ft.) (75°F)	密 度 (lb./cu. in.)
A1	150	0～300	−100～350	350	18.0	74	0.30
B1	150	0～300	−100～700	1000	25.0	475	0.29
B2	127	100～550	−100～1000	1000	25.0	424	0.29
B3	120	200～600	−100～1000	1000	25.0	415	0.29
B11	140	150～450	−100～1000	1000	25.0	452	0.30
BN	46	0～400	−100～1000	1000	28.5	95	0.31
BP1	185	0～300	−100～500	800	20.0	650	0.29
B100R	113	0～300	−100～700	1000	26.0	100	0.30
B125R	129	0～300	−100～700	1000	26.0	125	0.30
B150R	137	0～300	−100～700	1000	26.0	150	0.30
B175R	142	0～300	−100～700	1000	25.5	175	0.30
B200R	144	0～300	−100～700	1000	25.5	200	0.29
B250R	147	0～300	−100～700	1000	25.5	250	0.29
B300R	149	0～300	−100～700	1000	25.0	300	0.29
B350R	149	0～300	−100～700	1000	25.0	350	0.29
B400R	149	0～300	−100～700	1000	25.0	400	0.29
C1	154	0～300	−100～700	1000	25.0	483	0.29
C3	123	200～600	−100～800	1000	25.0	415	0.29
C11	144	150～450	−100～900	1000	25.0	456	0.29
D560R	144	0～300	−100～700	1000	24.0	560	0.28
E1	138	0～300	−100～700	1000	25.0	500	0.29
E3	100	200～600	−100～1000	1000	25.0	440	0.29
E4	80	250～700	−100～1000	1000	25.0	406	0.29
E5	60	300～800	−100～1000	1000	25.5	360	0.29
F15R	70	0～300	−100～500	700	20.0	15	0.32
F20R	128	0～300	−100～500	700	20.0	20	0.31
F25R	135	0～300	−100～500	700	22.0	25	0.31
F30R	139	0～300	−100～500	700	23.0	30	0.30
F35R	142	0～300	−100～500	700	23.5	35	0.30

续表

牌 号	温曲率 (10^{-7}°F^{-1}) (50～200°F)	最大敏感温度范围 (°F)	有效偏转温度范围 (°F)	推荐最大温度 (°F)	弹性模量 (10^6 lbs/sq. in.)	电阻率 (Ω·cm/ft.) (75°F)	密 度 (lb./cu. in.)
F40R	144	0～300	−100～500	700	24.0	40	0.30
F50R	146	0～300	−100～500	700	24.0	50	0.30
F60R	146	0～300	−100～500	700	24.5	60	0.30
F70R	147	0～300	−100～500	700	24.5	0	0.30
F90R	148	0～300	−100～500	700	25.0	90	0.30
F100R	148	0～300	−100～500	700	25.0	100	0.30
F125R	148	0～300	−100～500	700	25.0	125	0.30
G1	139	0～300	−100～700	1000	25.0	472	0.29
G3	104	200～600	−100～1000	1000	25.0	420	0.29
G7	61	0～800	−100～1000	1000	27.5	440	0.28
GB14	103	0～300	−100～1000	1000	26.0	511	0.29
J1	134	0～300	−100～500	625	19.0	110	0.31
J7	56	0～625	−100～500	625	22.0	106	0.30
M7	40	0～800	−100～1000	1000	27.5	435	0.29
MB18	140	0～300	−100～1000	1000	24.0	470	0.29
N1	102	0～300	−100～500	1000	26.0	95	0.31
P3	180	200～600	−100～600	800	20.0	565	0.28
P30R	188	0～400	−100～500	700	20.0	30	0.30
P35R	198	0～400	−100～500	700	20.0	35	0.30
P40R	201	0～400	−100～500	700	20.0	40	0.29
P50R	207	0～400	−100～500	700	20.0	50	0.29
P60R	210	0～400	−100～500	700	20.0	60	0.29
P70R	211	0～400	−100～500	700	20.0	70	0.29
P90R	213	0～400	−100～500	800	20.0	90	0.29
P100R	214	0～400	−100～500	800	20.0	100	0.29
P125R	215	0～400	−100～500	800	20.0	125	0.29
P150R	215	0～400	−100～500	800	20.0	150	0.28
P175R	215	0～400	−100～500	800	20.0	175	0.28
P200R	215	0～400	−100～500	800	20.0	200	0.28
P250R	215	0～400	−100～500	800	20.0	250	0.28
P300R	215	0～400	−100～500	800	20.0	300	0.28
P350R	215	0～400	−100～500	800	20.0	350	0.28
P400R	215	0～400	−100～500	800	20.0	400	0.28
P450R	215	0～400	−100～500	800	20.0	450	0.28
P500R	215	0～400	−100～500	800	20.0	500	0.28
P550R	215	0～400	−100～500	800	20.0	550	0.28
P600R	215	0～400	−100～500	800	20.0	600	0.28
P675R	215	0～400	−100～500	800	20.0	675	0.28
P850R	150	0～400	−100～500	800	19.5	850	0.27
PJ	75	0～600	−100～625	625	17.0	120	0.30
1513	−21	500～800	225～1000	1000	23.0	395	0.29

注 1. 温曲率从华氏温度单位(°F)向摄氏温度单位转换只需乘系数 1.8 进行换算。

2. 电阻率从英制单位(Ω·cm/ft.)向公制单位(μΩ·cm)转换只需乘系数 0.16625 进行换算。

表 4.2-20 热双金属部分牌号对照表

FEPAC	PMC	ASTM	GB	TI	CHACE	HOOD	IMPHY	KANTHAL	DIN
FPA N—16	N—1	TM—22	5J1017	N1	3000	36—100	R15		
FPA 27—108	27—1			BP1					
FPA 27—93	27—560	TM—7		BP560R		HR560			
FPA 181—80	181—1	TM—20	5J1380	G1	2100	36—18			
FPA 181—70	181—3	TM—21	5J1070	G3	2300				
FPA 192—80	192—1		5J1580	C1	2450	36—19			
FPA 192—70	192—3	TM—18	5J1070	C3	3650	42—19			
FPA 192—75	192—11	TM—19	5J1380	C11	3950	39—19			
FPA 223—80	223—1	TM—1	5J1480	B1	2400	36—22	R80	145R80	
FPA223—69	223—3	TM—6		B3					
FPA 223—70	223—2	TM—30		B2	3600	42—22			
FPA 223—75	223—11			B11	3900	39—22			
FPA 223—16	223—N			BN	4800				
FPA 223—17	223—100	TM—9		B100R	6100	R22—100			
FPA 223—21	223—125	TM—10	5J1320B	B125R	6125	R22—125			
FPA 223—25	223—150	TM—11	5J1325B	B150R	6150	R22—150	R25		
FPA 223—30	223—175	TM—12	5J1430B	B175R	6175	R22—175			
FPA 223—35	223—200	TM—13	5J1433B	B200R	6200	R22—200			
FPA 223—40	223—250	TM—14	5J1440B	B250R	6250	R22—250	R40		
FPA 223—50	223—300	TM—15		B300R	6300	R22—300			
FPA 223—60	223—350	TM—16	5J1455B	B350R	6350	R22—350			
FPA 223—65	223—400	TM—17		B400R	6400	R22—400			
FPA 258—85	258—1			E1	2600	36—25			
FPA 258—75	258—3	TM—3		E3	2800	42—25			
FPA 258—70	258—4	TM—4		E4	3500	45—25			
FPA 258—60	258—5	TM—5		E5	2500	50—25			
FPA 703—12	703—1		5J1413	A1		36—62			
FPA 721—95	721—3	TM—23		P3	7000	42—10	BSP		
FPA 721—5	721—30			P30R	9030	R72—30	5SP		
FPA 721—6	721—35			P35R	9035	R72—35			
FPA 721—7	721—40			P40R	9040	R72—40			
FPA 721—8	721—50			P50R	9050	R72—50	8SP		
FPA 721—10	721—60			P60R	9060	R72—60			
FPA 721—12	721—70			P70R	9070	R72—70	11SP		
FPA 721—15	721—90			P90R	9090	R72—90	15SP		
FPA 721—17	721—100			P100R	9100	R72—100			
FPA 721—20	721—125			P125R	9125	R72—125	20SP		
FPA 721—25	721—150			P150R	9150	R72—150			
FPA 721—30	721—175			P175R	9175	R72—175			
FPA 721—35	721—200			P200R	9200	R72—200			
FPA 721—40	721—250			P250R	9250	R72—250	40SP		
FPA 721—50	721—300			P300R	9300	R72—300			
FPA 721—60	721—350			P350R	9350	R72—350	60SP		
FPA 721—70	721—400			P400R	9400	R72—400			
FPA 721—110	721—675	TM—2	5J20110	P675R	6650	36—10	108SP	200R110	
FPA 721—140	721—850	TM—8	5J14140	P850R	6850	R72—850	140SP	140R140	
FPA 982—2	982—15			F15R					

续表

FEPAC	PMC	ASTM	GB	TI	CHACE	HOOD	IMPHY	KANTHAL	DIN
FPA 982—3	982—20	TM—24		F20R	1020	HR20	R3		
FPA 982—4	982—25			F25R	1025	HR25	R4		
FPA 982—5	982—30	TM—25		F30R	1030	HR30			
FPA 982—6	982—35			F35R	1035	HR35	R6		
FPA 982—7	982—40			F40R	1040	HR40			
FPA 982—8	982—50	TM—26		F50R	1050	HR50	R8		
FPA 982—11	982—70	TM—27		F70R	1070	HR70	R11		
FPA982—15	982—90	TM—28		F90R	1090	HR90			
FPA982—17	982—100			F100R	1100	HR100	R16		
FPA982—21	982—125			F125R		HR125			
FPA 206—78		TM—29	5J1580		2420	36—20	AS	155	TB1577A
FPA 206—70					3820		BS	115	TB1170A
FPA 206—55							AS55	145R55	TB1555
FPA 206—40								145R40	
FPA 206—35							AS35	145R35	TB1435
FPA 206—30							AS30	145R30	
FPA 206—25							AS25	145R25	TB1425
FPA 206—17								145R17	
FPA 206—15								145R15	
FPA 206—11							AS11	145R11	TB1511
FPA 206—6A							AS6	135R05	
FPA 206—9							BS9	115R09	TB1109

4 热双金属的应用

4.1 热双金属材料的选择原则

成功地设计一个热双金属元件的关键是选择最有效的元件形状、选择最经济的材料牌号和选择最优化的尺寸。

热双金属元件的设计，需考虑以下因素：①工作温度；②元件将经受的最高温度；③电阻率；④位移或力的要求，或两者的结合；⑤空间限制；⑥工作条件等。

热双金属元件的形状一般分为四大类：螺旋形、直条形、碟形和特殊形状。①螺旋形元件包括了平螺旋、直螺旋和双螺旋等形状，平螺旋、直螺旋元件产生旋转动作，在很小的空间里，平螺旋是一种很紧凑的设计，可以产生较大的旋转动作；直螺旋使元件有较大的表面暴露于热源中，使吸热更快；双螺旋可以沿螺旋的轴线产生直线动作。②直条形元件可以产生缓慢的直线动作。③碟形元件可以产生瞬动的直线动作。④特殊形状元件产生的动作将由其形状决定，U型元件是一种比较常用的设计，它可以在一个有限的空间内产生较大的位移。

4.2 工作温度和温曲率

工作温度是热双金属动作的温度范围，工作温度的上限是由热双金属元件将经受的最高温度决定的。工作温度和工作温度上限一般应在热双金属的线性温度范围内，以保证热双金属元件动作的线性。当工作温度超出了热双金属的线性温度范围，但还在可用（有效）的温度范围时，热双金属元件动作的线性度将降低，但仍可继续使用。当工作温度超过了可用（有效）的温度范围时，热双金属元件将产生残余变形，导致工作特性发生变化。当工作温度超过热双金属的上限使用温度时，热双金属将产生软化而不能正常使用。

当工作温度范围在（－20～200)℃范围时，使用被动层材料为 Ni36 的两层中低温热双金属是合适的，国内比较有代表性的牌号是 FPA223—80 和 FPA206—78。其中 FPA223—80 牌号对应于国标 GB/T4461 5J1480 和美国 ASTM B388 TM1，FPA206—78 牌号对应于国标 GB/T4461 5J1580 和美国 ASTM B388 TM29 和德国 DIN1715 TB1577A。

当使用这两种牌号满足不了热敏感性要求时（如用于很小的温度变化和较小的工作空间等场合），可以采用 FPA721—110 牌号，其对应于国标 GB/T4461 5J20110 和美国 ASTM B388 TM2 和德国 DIN1715 TB20110。它的热敏感性能（温曲率）比 FPA223—80 和 FPA206—78 高将近 40%，而由于其原材料的冶炼和制造过程比较困难，故价格较贵，在使用过程中，由于其具有很高的热敏感性能（温曲率），材料的密度较小，所用材料的重量相对较少，可以抵消部分价格较贵的因素。

当通过外部介质进行热传导，并且需要较短的反应时间时，可以选择中间夹铜（由于铜具有较高的热导率）并具有较高热导率和较高温曲率的牌号，但当中间铜层较厚时，热双金属的热敏感性（温曲率）将会有较大的下降，在选择时需要考虑这方面的影响因素。具有较高热导率并有较高温曲率值的热双金属代表牌号有 FPA206—11、FPA721—12、FPA721—8 和 FPA982—8 等牌号。它们的热导率约为 70W/(m·K)，而温曲率只比对应的两层材料低一点。

当工作温度范围在(－20～380)℃范围时，使用被动层材料为 Ni42 的两层高温热双金属是合适的，国内比较有代

表性的牌号是 FPA206—70 和 FPA223—70。当需要提高热传导特性时，可以选择中间夹铜的 FPA206—9，热导率约为 88W/(m·K)，而温曲率比对应的两层材料低一点。当需要更高的温曲率时，可以选择 FPA721—95，它的温曲率达到 33.3×10^{-6}/℃，目前该牌号使用较少。

4.3 电阻率

当热双金属元件通电加热时，其产生的热量可以通过下式计算：

$$Q = I^2Rt$$

式中：Q 为发热量，J；I 为电流，A；R 为电阻，Ω；t 为时间，s。

当不考虑热损失时，热双金属的温升可以通过下式进行计算：

$$\Delta T = \frac{I^2Rt}{mc}$$

式中：ΔT 为温升，℃；m 为质量，g；c 为比热容，J/(g·℃)。

可见元件的温升与 I^2R 成正比，而电阻值 R 与电阻率 ρ 是成正比的，即元件的温升与 $I^2\rho$ 成正比。而断路器的温升要求一般是不变的，因此，可以通过选择使用不同电阻率的热双金属来满足不同额定电流的断路器的要求。

在两层的热双金属中间加入铜层或镍层，通过调整厚度比例，可以形成一系列不同电阻率的热双金属材料，这为热双金属的系列化选择提供了较大的空间。如佛山精密电工合金有限公司的 FPA982 电阻系列、FPA223 电阻系列、FPA206 电阻系列和 FPA721 电阻系列热双金属，其电阻率从 2.5～66μΩ·cm，形成了完整的电阻系列热双金属牌号。

当温度上升时，热双金属的电阻率增大，对于需要通电的热双金属元件在设计时需要考虑该问题，热双金属电阻率随温度变化的情况参见表 4.2-21。同时也应考虑材料存在热传导和热辐射等散热过程，因此，这些温升的计算只能是近似的，需要进行试验校正。

表 4.2-21 热双金属电阻率与温度变化的关系

FEPAC 牌号	电阻率（μΩ·cm）					
	24℃	93℃	149℃	204℃	260℃	316℃
FPA N—16	15.3	20.8	24.8	29.4	34.6	40.6
FPA 27—108	108.1	116.4	119.7	123.0	125.5	126.4
FPA 27—93	93.1	99.6	103.9	107.7	110.7	113.2
FPA 181—80	78.5	85.0	89.3	93.3	96.8	99.8
FPA 181—70	69.8	79.6	86.5	92.4	97.9	102.2
FPA 192—80	80.3	86.9	91.1	94.6	97.3	99.8
FPA 192—70	69.8	78.8	85.5	91.4	96.6	101.2
FPA 192—75	75.8	84.3	90.3	95.4	99.8	102.7
FPA 223—80	79.0	86.0	89.6	94.3	97.3	100.2
FPA 223—70	69.0	79.6	85.6	90.9	95.9	99.9
FPA 223—75	75.1	86.3	93.6	99.4	104.1	107.6
FPA 223—16	15.8	20.0	24.1	29.1	34.9	41.6
FPA 223—17	16.6	21.6	25.8	29.9	35.7	41.6
FPA 223—21	20.8	26.3	30.9	35.7	41.2	47.0
FPA 223—25	24.9	32.1	37.7	43.7	49.9	56.2
FPA 223—30	29.1	35.7	41.6	48.2	54.9	61.5
FPA 223—35	33.3	41.4	47.5	54.0	60.3	67.3

续表

FEPAC 牌号	电阻率（μΩ·cm）					
	24℃	93℃	149℃	204℃	260℃	316℃
FPA 223—40	41.6	50.0	56.5	62.8	68.8	74.8
FPA 223—50	49.9	58.4	64.5	70.3	75.5	80.6
FPA 223—60	58.2	66.7	73.0	79.0	84.3	89.6
FPA 223—65	66.5	74.8	80.1	85.5	90.3	94.3
FPA 258—85	83.1	89.3	93.3	96.9	100.2	102.7
FPA 258—75	73.2	83.0	89.6	96.3	102.4	104.7
FPA 258—70	67.5	78.0	85.1	92.6	99.3	103.4
FPA 258—60	58.2	69.8	77.6	85.5	93.3	101.1
FPA 703—12	12.3	13.0	13.5	0.0	0.0	0.0
FPA 721—95	93.9	106.7	113.1	122.2	128.0	133.0
FPA 721—5	5.0	5.8	6.7	7.5	8.3	9.1
FPA 721—6	5.8	7.1	8.3	9.1	10.0	10.8
FPA 721—7	6.6	8.1	9.5	10.6	11.8	13.0
FPA 721—8	8.3	10.0	11.3	12.6	14.0	15.3
FPA 721—10	10.0	12.6	14.1	15.3	16.3	17.1
FPA 721—12	11.6	14.6	16.6	18.1	19.1	20.0
FPA 721—15	15.0	18.3	20.8	22.9	24.6	25.8
FPA 721—17	16.6	20.0	22.8	25.4	27.9	30.1
FPA 721—20	20.8	25.3	28.3	31.3	33.6	35.7
FPA 721—25	24.9	29.9	33.4	36.7	40.1	43.2
FPA 721—30	29.1	33.9	37.7	41.2	44.9	47.9
FPA 721—35	33.3	37.4	40.7	44.1	47.4	50.7
FPA 721—40	41.6	48.2	52.4	59.0	62.8	65.7
FPA 721—50	49.9	61.5	70.3	79.1	86.6	93.3
FPA 721—60	58.2	67.8	75.1	82.3	89.1	95.6
FPA 721—70	66.5	78.1	86.1	93.4	99.8	104.7
FPA 721—110	112.2	119.7	124.7	128.7	131.8	134.0
FPA 721—140	141.3	147.5	151.1	153.9	156.3	157.9
FPA 925—18	18.3	19.1	20.0	20.6	21.4	21.9
FPA 925—16	17.6	18.3	19.0	19.6	20.3	20.8
FPA 982—2	2.5	3.2	3.7	4.2	4.7	5.2
FPA 982—3	3.3	4.0	4.7	5.3	6.0	6.7
FPA 982—4	4.2	5.0	5.7	6.3	7.1	8.0
FPA 982—5	5.0	6.0	6.8	7.6	8.5	9.5
FPA 982—6	5.8	6.8	7.6	8.8	9.8	10.8
FPA 982—7	6.7	8.0	9.0	10.0	11.1	12.1
FPA 982—8	8.3	10.1	11.5	12.8	14.1	15.5
FPA 982—15	15.0	17.8	20.0	22.1	24.3	26.1
FPA 982—17	16.6	19.0	21.1	23.3	25.6	27.9
FPA 982—21	20.8	24.9	27.4	30.8	34.1	37.4
FPA 206—78	78.0	84.0	88.0	92.5	95.6	98.0
FPA 206—25	25.0	32	37	43	49	56
FPA 206—35	35.0	43.0	48.0	55.0	60.0	65.0
FPA 206—55	55.0	64.0	70.0	76.0	82.0	87.0

4.4 热双金属元件的成型与安装

热双金属元件一般采用冲压成型，部分元件在下料后还需要进行折弯成型。

冲压成型时应该避免使切口边缘产生塌边变形并留下毛

刺。当切口边缘产生塌边变形和毛刺（相当于形成了加强筋）时，将会降低热双金属的热变形量。同时，当元件的宽度大于长度的20%时，由于元件在受热时产生的横向弯曲（相当于形成了加强筋）也将会降低热双金属的热变形量，在设计时需要考虑这方面的影响。

为了减少切口变形和毛刺，应该使用精密的冲压工具进行冲压成型，在计算所需的剪切力时，一般用600N/mm²的剪切强度来计算所需的剪切力。

热双金属主动层和被动层的硬度不一样，在冲压热双金属时，建议从硬的组元层开始剪切。以获得更好的切口状况。

热双金属是复合材料，在冲压成型过程中的回弹较难确定，同时热双金属是热敏感材料，受热将产生弯曲变形，因此在冲压过程要保证冲压模具的冷却，以便获得良好的尺寸公差，建议在恒温的条件下进行冲压加工。

热双金属材料的性能在冷轧加工过程中存在方向性，材料的温曲率在平行于轧制方向比垂直于轧制方向大1%～2%，材料的允许弯曲应力在垂直于轧制方向只有平行于轧制方向的大约90%。为了保证热双金属材料使用性能的一致性，不同轧制方向冲压的元件一般不允许同时混用。

热双金属元件在加工成型过程中有可能需要进行折弯成型，在折弯时尽量垂直于轧制方向，以便获得更高的强度，同时尽量避免小半径的折弯，弯曲半径应大于材料厚度的1.5倍。由于高敏感热双金属材料的主动层材料是高锰材料，该材料比较脆，在折弯选择时，应尽量把较脆的材料弯在里面，以避免在折弯过程中产生开裂。当主动层材料必须在折弯的外面时，可以通过适当降低冷变形量来降低材料的硬度，以减少折弯时开裂，但降低冷变形量时，材料的强度也会下降，因此需要通过试验找到一个平衡点。

热双金属元件的安装一般采用点焊和铆接两种方式。在微型断路器中当额定电流小于63A时，热双金属一般采用点焊的方式进行固定，而当额定电流大于80A时，热双金属则采用铆接的方式进行固定。

4.5 热双金属元件的稳定化处理

热双金属的组元层材料不同，组元层材料间的塑性变形特性也不一样，复合后，组元层材料之间的塑性变形受到了约束，在生产过程中将产生较大的残余应力，在元件进行冲压成型和铆接、焊接固定过程中，也会产生残余应力。这些残余应力在没有得到外来能量供给的情况下，将会逐渐地进行重新分布和部分释放，这将影响到热双金属材料性能的稳定性，最终影响到电器性能的稳定性，使电器的特性随时间产生漂移现象，甚至失效。

通过稳定化热处理，可以使部分残余应力得到释放，并使其均匀化，从而减少残余应力对电器性能产生的影响。

热双金属元件的稳定化热处理温度应比实际使用的最高工作温度至少要高50℃以上，但不能高于热双金属材料的上限使用温度，超过上限使用温度，将会使材料的机械性能恶化。

稳定化热处理一般在电炉中进行，如果对表面要求较高，可以在真空炉或在保护气氛下进行热处理。在热处理过程中，加热和冷却速度建议控制在20℃/min以内，同时由于热双金属元件将发生弯曲变形，应尽量避免对热双金属元件产生约束，以免产生新的残余应力。

在使用电炉进行热处理时，应选用温度场均匀的炉子进行，并有合理的装炉量，以保证热双金属元件在炉内受热均匀，使元件之间获得一致的热处理效果。

对于控制精度要求较高的使用场合，建议对元件进行2～3次循环稳定化热处理，以更好地消除残余应力对电器性能稳定性的影响。

对于断路器，稳定化处理也可以通过对已经安装好的热双金属组件通电的形式进行。用几倍工作电流短时反复几次通电，也可以达到消除残余应力的目的。

4.6 热双金属元件的防护

由于大部分热双金属材料的组元材料成分都含有较高比例的镍元素，具有一定的防锈能力，因此，在没有腐蚀性的大气环境下使用，热双金属元件一般不需要特别的保护。但是，由于主动层和被动层及中间层组元材料的成分不同，当热双金属元件暴露于潮湿空气或腐蚀性气氛（如二氧化硫、海风、盐雾、酸雾等）时，将会产生腐蚀生锈的问题。热双金属材料在存放过程中应采取适当的措施进行防护，打开包装后应尽快使用，暂时用不完时应包装完好，以免产生生锈腐蚀的问题。

在热双金属元件加工和使用过程中应避免直接用手接触热双金属材料，由于手汗含有盐份等腐蚀性介质，用手直接接触元件时将会使元件生锈。

为避免生锈的情况，可以对热双金属元件进行镀锡、镀镍或涂防锈油等防护处理，如果条件合适，也可以选用由不锈钢复合而成的热双金属，但这种热双金属的温曲率比较低。

4.7 热双金属元件的计算

热双金属元件的典型形状和基本公式见表4.2-22，表中热弯曲量D、机械力P、热力F和最大负荷应力σ_{max}的含义如下：

D为元件自由端在没有受到任何作用力和约束的情况下，当温度变化时产生的位移量。对于螺旋型元件，则是自由端转动的角度。

P为在恒定温度下使元件产生所需位移的力。

F为在元件完全受到约束的情况下，当温度变化时产生的力。

σ_{max}为当元件工作时产生的最大应力值，该应力值不能超过热双金属材料的最大负荷应力值。热双金属的最大负荷应力随温度的升高而降低。

热双金属元件一般都在弯曲和热力同时存在的情况下工作，在工作温度范围内温度变化的一半用于产生弯曲，另一半用于产生热力时，元件的体积最小。当1/3的温度变化用于产生热力时，对于悬臂梁、简支梁、U型、平螺旋和直螺旋元件在给定宽度下元件的长度最小。当2/3的温度变化用于产生热力时，对于悬臂梁、简支梁、和U型元件在给定宽度下元件的厚度最小。

在给定了弯曲和力的情况下，在允许工作温度范围内，选用最高温曲率的热双金属材料，元件的体积最小。

元件计算示例如下。

例1 以FPA223—80制成悬臂梁元件，元件的有效长度为35mm，自由端无任何约束，当温度从25℃变化到145℃时，产生2.1mm的位移，求元件的厚度。

解：FPA223—80的温曲率为27×10^{-6}/℃，根据悬臂梁的基本公式，自由端的弯曲为

$$D=\frac{0.53K\Delta TL^2}{t}$$

$$t=\frac{0.53K\Delta TL^2}{D}$$

$$=\frac{0.53\times27\times10^{-6}\times(145-25)\times35^2}{2.1}\text{mm}$$

$$=1.0\text{mm}$$

元件的厚度为 1.0mm。

例 2 以 FPA721—110 制成悬臂梁元件，元件的有效长度为 50mm，元件自由端承受 2N 的负荷，当温度从 25℃变化到 95℃时，产生 2.5mm 的位移，计算元件的尺寸。

解：FPA721—110 的温曲率为 39.4×10^{-6}/℃，弹性模量为 138 000N/mm²。工作温度变化 70℃，一半用于产生位移，一半用于产生热力。根据悬臂梁的基本公式，自由端的弯曲为

$$D=\frac{0.53K\Delta TL^2}{t}$$

厚度可以根据热弯曲公式换算求得为

$$t=\frac{0.53K\Delta TL^2}{D}$$

$$=\frac{0.53\times39.4\times10^{-6}\times(95-25)\times0.5\times50^2}{2.5}\text{mm}$$

$$=0.73\text{mm}$$

热力的公式为 $F=\dfrac{0.53KE\Delta Tw t^2}{4L}$

宽度可以根据热力公式换算求得为

$$w=\frac{4FL}{0.53KE\Delta Tt^2}$$

$$=\frac{4\times2\times50}{0.53\times39.4\times10^{-6}\times138\,000\times35\times0.73^2}\text{mm}$$

$$=7.5\text{mm}$$

验算得最大负荷应力为

$$\sigma=\frac{6FL}{wt^2}=\frac{6\times2\times50}{7.5\times0.73^2}\text{N/mm}^2=151.3\text{N/mm}^2$$

没有超过 FPA721—110 最大允许应力 200N/mm²。

例 3 由于空间限制，长度不能超过 25mm，现采用等臂 U 型元件获得 40mm 的有效长度，元件自由端承受 1.35N 的负荷，当工作温度从 20℃变化到 120℃时，产生 1.5mm 的位移，要求该材料可以经受 370℃的温度，请选择材料的牌号和计算元件的尺寸。

解：根据该元件的工作温度和可以经受 370℃温度的要求，选择材料的牌号为 FPA223—80，其温曲率为 27×10^{-6}/℃，弹性模量为 172 000N/mm²。

根据 U 型元件的基本公式，自由端的弯曲为

$$D=\frac{0.53K\Delta TL^2}{2t}$$

厚度可以根据热弯曲公式换算求得为

$$t=\frac{0.53K\Delta TL^2}{2D}$$

$$=\frac{0.53\times27\times10^{-6}\times(120-20)\times0.5\times40^2}{2\times1.5}\text{mm}$$

$$=0.38\text{mm}$$

热力的公式为 $F=\dfrac{0.53KE\Delta Tw t^2}{2L}$

宽度可以根据热力公式换算求得为

$$w=\frac{2FL}{0.53KE\Delta Tt^2}$$

$$=\frac{2\times1.35\times40}{0.53\times27\times10^{-6}\times172\,000\times50\times0.38^2}\text{mm}$$

$$=6.0\text{mm}$$

验算得最大负荷应力为

$$\sigma=\frac{3FL}{wt^2}=\frac{3\times1.35\times40}{6.0\times0.38^2}\text{N/mm}^2=186\text{N/mm}^2$$

没有超过 FPA223—80 最大允许应力 200N/mm²。

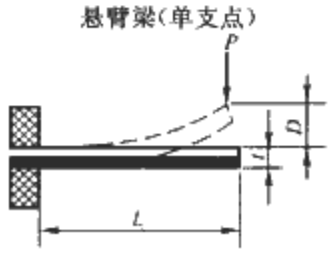
4.8 闪动式碟形元件

闪动式碟形元件（snap action discs）是一种比较特殊的热双金属元件，它通过冲压等机械成形方式预先加工成碟形，该碟形的方向与热双金属热弯曲的方向相反，当温度升高到某一温度 T_2 时，由于主动层材料的膨胀作用，碟形元件产生突跳动作，突然反向翻转，当温度下降到某一温度 T_1 时，由于主动层材料的收缩作用，碟形元件又产生突跳动作，翻转回原来的形状。这一特性使其可广泛地用于热过载保护的电器控制装置中，当温度异常升高超过某一设定温度时，碟形元件产生突跳动作切断电源，起到保护作用，当温度下降到设定温度时，碟形元件翻转回原来的形状，继续通电。一般情况下热双金属碟形元件可以承受这样的循环过程 100 000 次。

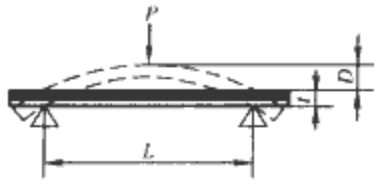
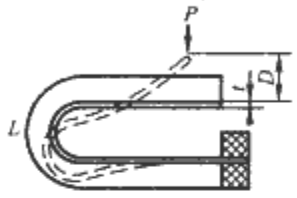
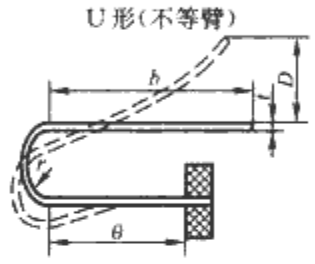
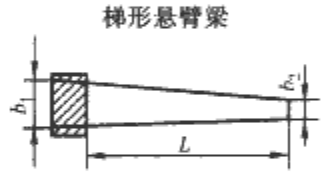
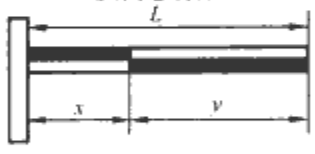
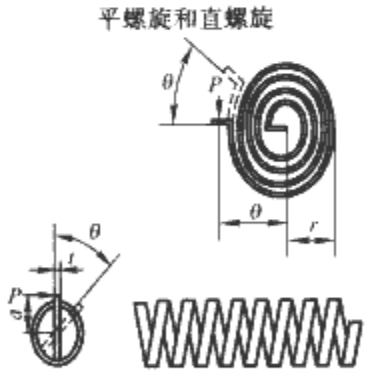
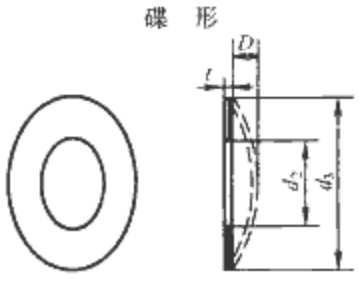
可以通过选择热双金属的牌号、不同的碟片直径 D、不同的碟片厚度 t、不同的预弯碟形深度 H_0 和形状来改变突跳温度 T_2 和 T_1 的数值。一般情况下，D/t 的数值应在 60～150 之间，H_0/t 的数值应在 1.4～4 之间。

突跳温度 T_2 和 T_1 的一般精度为±(3～5)℃之间，精度高的可以达到±(1～2)℃之间。突跳温度的一致性与碟形元件厚度精度的一致性、碟形冲压成形过程的一致性以及元件残余内应力分布的均匀性密切相关。

表 4.2-22 常用的热双金属元件几何形状及计算公式

基本形状	基本公式			
	热弯曲量 D(mm)	机械力 P(N)	热力 F(N)	最大负荷应力 σ_{max}(N/mm²)
悬臂梁(单支点) 	$D=\dfrac{0.53K\Delta TL^2}{t}$	$P=\dfrac{ED w t^3}{4L^3}$	$F=\dfrac{0.53KE\Delta Tw t^2}{4L}$	$\dfrac{6FL}{wt^2}$

续表

基本形状	基本公式			
	热弯曲量 D(mm)	机械力 P(N)	热力 F(N)	最大负荷应力 σ_{max}(N/mm²)
简支梁(双支点) 	$D=\frac{0.53K\Delta TL^2}{4t}$	$P=\frac{4EDwt^3}{L^3}$	$F=\frac{0.53KE\Delta Twt^2}{L}$	$\frac{3FL}{2wt^2}$
U形(等臂) $L=2b+\pi R$ $L=2b,(R<L/15)$ 	$D=\frac{0.53K\Delta T(L^2-1.87R^2)}{2t}$ $D=\frac{0.53K\Delta TL^2}{2t}$	$P=\frac{EDwt^3}{L^3-11.2R^2b-12.2R^3}$ $P=\frac{EDwt^3}{L^3}$	$F=\frac{0.53KE\Delta Twt^2(L^2-1.87R^2)}{2(L^3-11.2R^2b-12.2R^3)}$ $F=\frac{0.53KE\Delta Twt^2}{2L}$	$\frac{6F(b+R)}{wt^2}$ $\frac{6FL}{wt^2}$
U形(不等臂) 	$D=\frac{0.53K\Delta T(b^2-a^2+2ab+4R^2+2\pi Rb)}{t}$	$P=\frac{EDwt^3}{L^3}$(近似)	$F=\frac{0.53KE\Delta Twt^2}{2L}$(近似)	$b+R>a-b$ 和 $b\geqslant a$ 时: $\frac{6F(b+R)}{wt^2}$ $a-b>b+R$ 时: $\frac{6F(a-b)}{wt^2}$
梯形悬臂梁 	$D=\frac{0.53K\Delta TL^2}{t}$	$P=\frac{EDb_1t^3\lambda}{12L^3}$ $n=b_2/b_1$ 时 λ 值: 0 2.000; 0.1 2.157; 0.2 2.282; 0.3 2.393; 0.4 2.494; 0.5 2.589; 0.6 2.678; 0.7 2.763; 0.8 2.845; 0.9 2.924; 1.0 3.000	$F=\frac{0.53KEDb_1t^2\lambda}{12L}$ $n=b_2/b_1$ 时 λ 值: 0 2.000; 0.1 2.157; 0.2 2.282; 0.3 2.393; 0.4 2.494; 0.5 2.589; 0.6 2.678; 0.7 2.763; 0.8 2.845; 0.9 2.924; 1.0 3.000	$\frac{6FL}{b_1t^2}$
反向悬臂梁 	$D=\frac{0.53K\Delta T(y^2-2xy-x^2)}{t}$	$P=\frac{EDwt^2}{4L^3}$	$F=\frac{0.53K\Delta Twt^2(y^2-2xy-x^2)}{4L^3}$	
平螺旋和直螺旋 	$\theta=\frac{0.53\times360K\Delta TL}{\pi t}$	$P=\frac{2\pi Ewt^3\theta}{360\times12Le}$	$F=\frac{0.53KE\Delta Twt^2}{6e}$	$\frac{6Fe}{wt^2}$
碟形 	$D=\frac{0.53K\Delta T(d_1^2-d_2^2)}{4t}$	$P=\frac{4EDt^3}{d_1^2-d_2^2}$	$F=0.53KE\Delta Tt^2$	$\frac{3F}{2t^2}$

第 3 章 电 瓷 材 料

电瓷是输变电线路和电力设备中应用最广泛的绝缘器材之一，电瓷材料是电瓷产品的基础，其性能决定了电瓷产品的种类、档次。

1 电瓷原料

电瓷原料绝大部分来自于矿山，由于其成因及产地的不同，它们的性能也各不相同。电瓷原料的选择是电瓷材料制造的重要环节之一，它与工艺流程、机械设备和生产控制制度密切相关，同时也决定了电瓷材料工艺性能和瓷质性能的优劣。为了最大限度地满足电瓷材料的性能要求，采用多种性能各异的原料是非常必要的。

1.1 电瓷材料的分类

电瓷原料通常按照其工艺特性和在电瓷材料中的作用进行分类，一般可以分为以下几类：

(1) 黏土原料/可塑性原料。

(2) 瘠性原料。

(3) 熔剂性原料。

(4) 其他原料。

1.2 黏土原料

黏土原料是多种矿物的混合体，其中主要是含水铝硅酸盐矿物。尽管各种黏土原料的矿情千差万别，但在一定程度上它们或多或少地都有可塑性，即黏土细粉加水调匀后，可以塑造成各种形状，干燥后维持原状不变，并且有一定强度。

1.2.1 黏土原料在电瓷坯、釉中的作用及一般技术要求

在电瓷坯料中，黏土原料可赋予坯料可塑性能和成型性能，并使坯体具有一定的干燥强度；黏土原料还可提供给瓷坯一定量的 SiO_2 和 Al_2O_3，烧成时能够生成一定数量的莫来石，可提高瓷质的机械性能、电气绝缘性能和耐冷热急变性能。在釉料中，黏土原料可提高釉浆的悬浮性和釉料对坯体的附着力，增大釉的高温黏度，增加釉面的硬度，降低釉的膨胀系数。

黏土的一般技术要求如下：

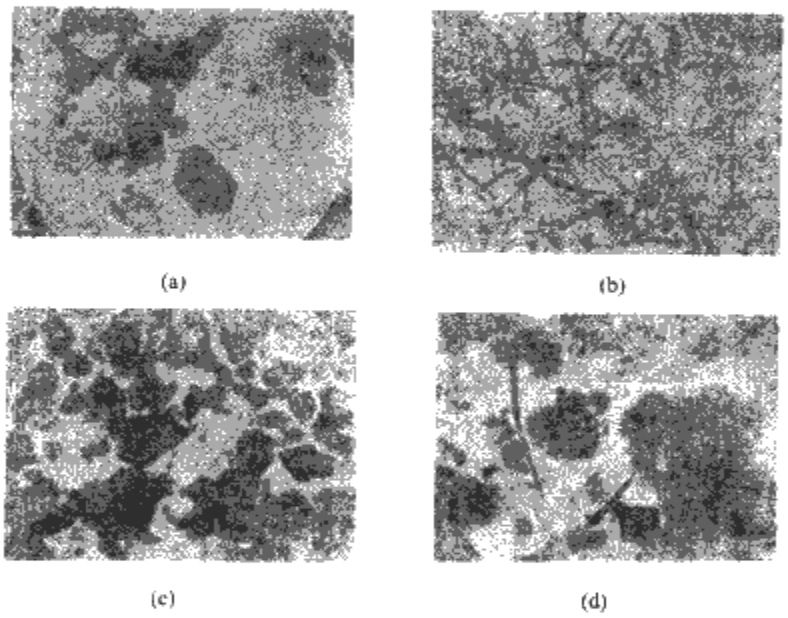
(1) 非可塑性高岭土类黏土，其 $Fe_2O_3<1.0\%$，$CaO+MgO<1.0\%$，主要成分 $Al_2O_3>36\%$（波动幅度小于 3%）。

(2) 可塑性高岭土类黏土和水云母类黏土，其 $Fe_2O_3<1.6\%$，$CaO+MgO<2.0\%$，主要成分 $Al_2O_3>20\%$（波动幅度小于 3%），并且具有较好的可塑性和结合性。

(3) 蒙脱类黏土，其 $Fe_2O_3<1.5\%$，主要成分 $Al_2O_3>12\%$（波动幅度小于 3%），并且具有很好的可塑性和结合性，其中，结合力（50%纯土与 50%砂混合后）大于或等于 4.0MPa。

1.2.2 黏土原料的主要矿物类型

黏土原料通常有 3 种矿物类型：高岭石类、水云母类和蒙脱石类。实际上黏土原料除较纯的高岭石外，大多是混合类型的黏土矿物，如高岭石类黏土中常伴有水云母、石英；水云母类黏土中伴有高岭石、石英、长石；蒙脱石类黏土中伴有石英、伊利石类型矿物。黏土原料的主要矿物类型和工艺特性见表 4.3-1、黏土原料的晶型图见图 4.3-1。



(a) (b) (c) (d)

图 4.3-1 黏土原料的晶型图

(a) 高岭石矿物；(b) 多水高岭石矿物；(c) 水云母矿物；(d) 蒙脱石矿物

1.2.3 各种黏土原料的主要物理化学性能

(1) 黏土原料的化学成分和矿物组成

黏土原料的化学成分和矿物组成见表 4.3-2。

(2) 黏土原料的物理性能

黏土原料的物理性能见表 4.3-3。

表 4.3-1 黏土原料的主要矿物类型和工艺特性

矿物类型		化学式和组成 (%)	晶 型	工艺特性			
				可塑性成型型性能	干燥性能	加热过程特性变化	烧成性能
高岭石类黏土	高岭石	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ Al_2O_3 39.5 SiO_2 46.5 H_2O 14.0	属双晶结构，每一晶层由一层硅氧四面体和一层铝氧八面体通过公用的氧原子联系在一起。呈六角片状或杆状	一般厚片状结晶、粗颗粒多，成型水分低；薄片状结晶不良的，细颗粒多，成型水分高。前者可塑性较差，后者较好	收缩中等或偏低	(1) 加热至 450～500℃时，失重约 10%，晶格破坏，强度低 (2) 约550℃后，由受热膨胀开始转为受热收缩，强度逐渐增高	(1) 烧成收缩大，易开裂 (2) 烧结温度和耐火度都较高

续表

矿物类型		化学式和组成（%）	晶型	工艺特性			
				可塑性成型型性能	干燥性能	加热过程特性变化	烧成性能
高岭石类粘土	多水高岭石	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$ Al_2O_3 34.7 SiO_2 40.8 H_2O 24.5	结构与高岭石相同，只是晶层间填充了层间水。呈管状或杆状	成型水分很高，可塑性中等	收缩大	（1）加热时至60℃便大量失重，失重约12%，450～500℃时失重约10%左右； （2）60℃后，由微小膨胀转为微小收缩，450℃以后急剧收缩	（1）烧成收缩大，易开裂； （2）烧结温度和耐火度都较高。
水云母类		$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ K_2O 11.8 Al_2O_3 38.5 SiO_2 45.2 H_2O 4.5	呈细小鳞片状	成型水分不高，可塑性中等或偏低	收缩中等	（1）加热至450～600℃时，失重约4%～5%，强度稍有降低； （2）800℃以前，由于受热体积逐渐膨胀，以后受热无收缩现象	（1）烧结温度偏低，玻化温度范围较窄； （2）用量过多易引起瓷坯过火起泡
蒙脱石类		$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 6H_2O$ Al_2O_3 28.3 SiO_2 66.7 H_2O 5.0	呈微细的絮状或云雾状	成型水分很高，可塑性好，结合力强	收缩很大，易开裂；结合强度很高，干燥后吸湿性强	（1）加热至150℃以下就大量失重，失重约10%，并伴有急剧收缩； （2）加热至150～180℃之间时有较小的膨胀	烧结温度和耐火度都较低

表 4.3-2　　黏土原料的化学成分和矿物组成

原料名称	化学成分①									主要矿物组成
	SiO_2（%）	Al_2O_3（%）	Fe_2O_3（%）	CaO（%）	MgO（%）	K_2O（%）	Na_2O（%）	TiO_2（%）	IL（%）	
山西塑州土	57.32	28.55	1.28	1.01	0.62	1.48	0.13		9.58	高岭石、石英、水云母
山西左云土	56.89	27.15	1.53	0.50	0.52	1.17	0.08		11.81	高岭石、石英、水云母
山西广灵土	55.98	27.76	1.66	0.72	0.57	1.27	0.12		11.43	高岭石、石英、水云母
山西岳家庄土	47.18	34.42	1.41	0.32	0.40	1.12	0.16	1.72	12.79	高岭石
山西杜家庄土	47.29	35.19	0.83	0.34	0.26	1.09	0.13	1.99	12.38	高岭石
山西大同黏土	47.06	37.80	0.22	0.10	0.10	0.13	0.16		15.25	高岭石
山西介休高岭石	49.10	34.01	0.94	0.30	0.39	1.82	0.22	1.27	11.47	高岭石、水云母
山西介休淘洗土	61.28	24.57	1.32	0.56	0.36	2.62	0.31	1.00	7.84	水云母、高岭石、蒙脱石
山西介休李家土	64.82	22.82	1.03	0.36	0.41	1.70	0.13	0.97	7.67	高岭石、水云母、石英
山西介休黑碱土	45.34	37.73	0.40	0.31	0.18	0.26	0.10	1.29	13.97	高岭石（紫木节）
河北宣化瓷土	77.30	15.10	0.71	0.38	0.19	3.57	0.06	0.16	2.93	水云母、石英
河北宣化膨润土	74.96	13.09	0.30	1.35	1.16	3.81	0.18	0.07	5.05	蒙脱石、石英
河北邯郸红土	54.11	28.36	4.68	0.74	0.21	0.20	0.15	1.12	11.40	高岭石、水云母
河北徐水县明砂土	70.80	18.77	0.81	0.43	0.83	2.78	0.32		5.71	高岭石、水云母、石英
河北宽城淘洗土	57.53	27.13	1.06	0.39	0.99	2.16	0.13	0.37	9.99	高岭石、石英、水云母
河北沙河县章村土	47.25	35.99	0.80	0.46	0.49	8.57	0.96	0.70	4.99	水云母
唐山紫木节	44.90	34.95	1.35	1.30	0.6	0.7	0.19		16.62	高岭石
唐山三节土	46.84	35.26	1.34	0.95	0.66	0.40	0.45	0.94	12.61	高岭石
唐山碱石	44.59	38.23	1.36	0.58	0.01			0.30	14.71	高岭石
唐山碱矸	43.50	40.09	0.63	0.47		0.49	0.22	0.30	14.28	高岭石
唐山树皮黏土	56.83	27.30	3.00	1.53					10.89	高岭石、长石、石英
唐山四节土	61.97	25.46	1.18	0.76	0.72	1.78		0.70	6.98	高岭石、长石、石英
河北新城瓷土	63.12	26.13	0.12	0.33	0.56	4.00	1.60	0.35	3.82	水云母、高岭石
河北改性膨润土	70.41	14.56	1.17	3.72	2.26	1.33	3.21		4.69	蒙脱石、石英
内蒙东胜土	60.63	21.63	1.82	1.06	0.17	1.39	0.72	1.52	13.12	高岭石、石英、蒙脱石
内蒙樊家渠土	50.92	32.93	1.19	0.37	0.23	0.79	0.08	0.76	12.40	高岭石、石英
内蒙呼市膨润土	71.04	14.12	1.40	0.05	1.90	3.53	0.57	0.54	7.16	蒙脱石、石英

续表

原料名称	化学成分①									主要矿物组成
	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	IL (%)	
内蒙竹茂塔土	55.54	28.09	0.95	2.03	0.77			1.84	11.58	高岭石、石英
内蒙黑碱石	47.26	36.32	0.69	0.25	0.58			0.92	13.38	高岭石
内蒙达拉子瓷土	71.65	16.55	0.54	1.40	0.58	4.38	0.54		3.52	石英、白云母、娟云母
江西临川高岭土	46.57	36.39	0.17	1.02	0.28		1.57		14.64	高岭石、长石、石英
江西乐平枫高岭土	69.54	19.89	0.36	0.13		3.63	0.80		5.40	高岭石、石英、娟云母
江西小璜瓷土	71.55	16.36	1.33	0.84	0.80	3.95	0.42		4.32	水云母、石英
江西星子淘洗土	50.14	34.07	1.04	0.22	0.33	1.73	0.10		11.85	高岭石、石英、水云母
景德镇明砂高岭石	47.77	37.18	0.74	0.45	0.38	2.10	0.53	0.05	11.31	高岭石、石英、水云母
江西贵溪高岭土	53.13	31.47	1.01	2.00	0.68	2.53	2.07		7.98	高岭石、石英、白云母
景德镇大洲高岭石	48.08	37.37	1.4	1.15		0.30	0.80		11.18	高岭石、石英、水云母
江西南港瓷石	71.87	18.26	0.46	1.39	0.35	3.26	0.49	0.10	3.89	石英、娟云母、高岭石
江西余干瓷石	75.47	14.60	0.59	1.13	0.30	3.93	1.74		2.60	石英、娟云母、长石
景德镇三宝蓬瓷石	74.21	15.58	0.70	0.97	0.05	1.99	4.12		1.81	石英、娟云母、长石
江西瑶里瓷石	72.90	15.66	0.48	1.57	0.09	2.98	2.47		3.31	长石、石英娟、云母
江西陈湾瓷石	74.53	15.59	1.73		0.22	1.44	5.85	0.03	0.79	石英、长石、娟云母
山东蒙阴土	54.26	29.80	1.4	0.66	0.47	0.91	0.27	1.36	10.30	蒙脱石、石英、伊利石
明水黏土	44.67	38.30	0.70	0.48	0.20	0.24	0.23	0.80	13.93	高岭石
烟台黏土	44.75	38.32	0.85	0.59	0.35	0.20			13.85	高岭石
山东淄博焦宝石	44.52	39.35	0.95	0.66	0.30	0.21	0.10		14.36	高岭石
山东淄博大青土	63.23	23.45	1.44	0.42	0.43	2.20	0.35	1.32	7.28	高岭石、水云母
山东莱阳土	73.84	13.09	0.77	1.57	2.36	1.71	1.71		6.63	蒙脱石
安徽无为黏土	63.32	25.39	0.69	0.73	0.25	3.09	0.64		5.22	水云母、高岭石、石英、叶腊石
湖南醴陵马颈坳瓷石	73.57	14.31	0.87	0.62	0.35	4.27	0.45	0.08	3.15	水云母、高岭石、石英
湖南溆浦县黄茅园瓷石	49.25	34.40	0.44	0.32	0.14	1.38	0.25		13.30	多水高岭石、高岭石、水云母、石英
湖南衡山东糊瓷土	70.25	19.81	0.50	0.29	0.10	0.23	0.15		7.95	多水高岭石、石英
湖南衡山永明泥	67.82	21.13	1.15	0.27	0.44	1.84	0.38		7.01	高岭石、水云母、石英
湖南醴陵大林土	71.92	18.92	1.08	0.01	0.01	3.18	0.04	0.13	4.24	伊利石、石英
湖南醴陵沩山土	69.26	18.89	1.34	0.01	0.67	4.64	0.36	0.12	4.24	伊利石、石英
湖南衡山坪田洗泥	59.14	27.32	1.25			0.78	0.23		9.98	高岭石、石英
湖南醴陵茅坡黏土	72.02	13.00	0.75	0.82	0.60	2.08	0.15		4.78	高岭石、水云母
湖南醴陵默然塘黏土	70.38	19.70	1.12	0.55	0.30	4.10	0.07		3.43	水云母、高岭石、石英
湖南衡阳界牌洗泥	62.44	25.44	1.15	0.27	0.13	0.24	0.33		9.55	高岭石、石英
湖南衡阳马迹泥	68.64	20.88	0.27	0.17	0.18	0.91	2.34	0.08	5.93	高岭石、石英
广东清远县青草岭淘洗土	49.52	34.01	1.52	0.43	0.33	1.53	0.19	0.64	11.35	高岭石、石英
广东东莞二顺黏土	58.18	27.35	1.94	0.55	0.60	2.50	0.39		8.45	高岭石、水云母
广东清远县源潭黏土	50.32	34.30	1.50	0.46	0.60	1.68	0.38		11.71	高岭石、水云母
广东潮安县飞天燕瓷土	76.03	14.82	0.80	0.10	1.02	2.82	0.37		3.19	高岭石、石英、水云母、长石
广东潮安县飞天燕土胆	46.58	36.47	0.46	1.03	0.11	4.96	1.38		9.54	高岭石、石英、水云母、长石
广东饶平上山瓷土	73.68	15.96	0.55	1.56		2.66	0.97		4.98	高岭石、石英、水云母、长石
广东廉江禾寮土	71.66	17.86	0.47	0.76	0.25	1.14	0.36		6.90	高岭石、石英、水云母、长石
广东清远浸潭洗泥	44.96	35.27	0.52	1.05	0.42	5.48	0.51		9.06	高岭石、长石

续表

原料名称	化学成分①									主要矿物组成
	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	IL (%)	
广东大埔探简戈黏土	69.30	19.10	0.99	0.25	0.18	2.06	0.38		7.75	高岭石、石英、水云母
广东湛江稼社黏土	57.74	24.45	0.40		1.46	8.20	1.04		7.29	高岭石、长石、水云母、石英
河南博爱土	44.64	37.21	0.53	0.75	2.50	3.87	0.39	0.91	9.61	伊利石
河南神后黏土	71.95	14.34	0.52	1.79	0.35	0.37	0.19		10.99	高岭石、石英
河南禹州碱石	44.95	39.95	0.45	0.70	0.40	0.11	0.17		14.25	高岭石
河南汝州黏土	42.48	36.77	2.51	1.09	0.17	0.41	0.33		16.20	高岭石
河南北山黏土	35.58	30.50	0.52	4.54	0.50	0.46	0.14		26.91	高岭石、石灰石
河南南山黏土	64.64	22.80	1.58	1.01	0.64	1.29	0.14		7.63	高岭石、石英
河南唐河碱石	45.65	38.78	0.63	0.27	0.14	0.06	0.03	0.13	0.21	高岭石
苏州土2号机选	48.75	35.88	0.67	0.50	0.20		0.03		13.38	多水高岭石
南京皮库山黏土	51.20	29.00	0.90	1.10	0.60	4.12	0.21		12.65	迪开石、伊利石、石英
南京其林门土	63.00	23.70	1.20	1.10	0.70	5.09	0.30		4.93	伊利石、石英、高岭石
江苏宜兴溧阳膨润土	70.93	14.34	1.68	1.66	2.41	0.28	0.34		8.30	蒙脱石、石英
江苏吴县光福瓷石	78.43	14.36	0.23	0.56	0.21	3.70	0.46		2.00	石英、娟云母、长石
无锡阳山白泥	68.53	23.30	0.97	0.62	0.88	1.23	0.10		4.48	娟云母、石英
福建漳洲黏土	60.21	24.21	1.33	0.45	0.38	0.94	0.20	0.89	11.81	高岭石、石英
福建闽清池园井后黏土	48.74	35.40	1.25	0.15	0.33	1.50	0.07	0.21	12.16	高岭石、伊利石、石英
福建闽清白中保林黏土	76.73	15.39	0.09	0.18	0.05	0.40	3.94	0.11	2.95	高岭石、钠长石、石英
福建闽清云际金砂黏土	72.02	18.76	0.45	0.12	0.24	2.35	0.09	0.22	5.99	石英、埃洛石、伊利石
福建闽清池园保山黏土	75.93	17.00	0.29	0.13	0.07	0.35	0.04	0.13	6.45	多水高岭石、石英
福建闽清保山厂后黏土	76.28	16.49	0.41	0.14	0.22	2.80	0.14	0.11	3.74	石英、伊利石、高岭石
福建闽清岩前黏土	76.46	16.09	0.69	0.19	0.21	2.24	0.11	0.08	4.41	高岭石
福建闽清福斗黏土	73.58	18.91	0.26	0.18	0.05	0.14	0.05	0.08	7.17	高岭石、石英
福建闽清白中田中土	73.62	18.80	0.19	0.20	0.12	0.50	0.07	0.16	6.66	高岭石、石英
福建闽清池园保新土	74.74	17.98	0.20	0.20	0.14	0.45	0.09	0.08	6.43	石英、高岭石、多水高岭石
福建闽清庄洋黏土	76.36	15.96	0.53	0.18	0.18	2.82	0.08	0.11	3.94	石英、伊利石、高岭石
辽宁法库黏土	73.34	15.30	1.16	0.76	0.68	4.78	0.15		3.17	石英、水云母
辽宁本溪田师傅黏土	43.79	38.10	1.31	0.59	0.51	0.28	0.15	1.58	13.89	高岭石、石英、水云母
辽宁本溪红五号黏土	59.26	22.81	4.20	0.66	0.71	2.00	0.26		9.49	高岭石、石英、水云母、黄铁矿
辽宁建平黏土	78.27	10.94	0.30	1.50	0.13	4.51	1.63		2.09	石英、水云母
辽宁复州黏土	44.28	37.69	1.30	0.69	0.70			1.35	14.24	高岭石
辽宁黑山黏土	71.64	14.45	1.82	3.48	1.78	0.47	0.60		6.15	蒙脱石
吉林舒兰县水曲柳黏土	58.12	26.63	1.43	0.47	0.52	0.72	0.22	1.18	10.41	高岭石、水云母、石英
吉林盘石县烟筒山瓷土	78.48	13.15	0.73	0.18	0.24	2.24	2.29	0.10	1.52	石英、钠长石、水云母
辽宁巴林左旗干木伦大板高岭土	70.32	20.13	0.73	0.56	0.70				7.68	迪开石、石英
辽宁北票县国宝老黏土	76.44	14.53	1.50	0.51	0.44		0.34		2.89	高岭石、长石、石英
辽宁小平房黏土	72.80	18.56	0.70	0.63	0.36		0.06	0.08	7.35	高岭石、石英
辽宁巴林右旗林东叶蜡石	62.70	31.08	0.48		0.42				5.37	叶蜡石、石英
更刻黏土	76.46	15.12	1.12	0.34	0.38	3.37	0.61		2.59	水云母、石英、高岭石
南票木节土	53.71	30.28	1.09	0.90	0.60				11.80	高岭石
南票B石	45.81	38.51	0.57	0.30	0.15				14.30	高岭石
北票黏土	54.92	28.22	2.34	0.87	1.14				11.46	多水高岭石

续表

原料名称	化学成分①									主要矿物组成
	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	IL (%)	
彰武黏土	68.79	18.60	1.21	0.40	1.80	4.40	0.26	0.50	3.72	伊利石、石英
云南个旧黏土（白马寨）	70.70	17.10	0.15	0.96	1.00	3.73	0.30		6.28	水云母、石英
云南建水土	61.20	23.98	1.86	0.80	1.20	3.90	0.21		6.68	娟云母、石英、高岭石
四川叙永土	44.56	38.80	0.30	0.82	0.20	0.11	0.13		15.40	多水高岭石
四川汉原小堡土	45.18	36.36	0.67	0.09	0.86		0.20	0.03	15.78	埃洛石
四川威远白砂土	71.60	16.77	0.60	0.58	0.61	3.37	0.57		4.82	石英、水云母
四川威远土	65.54	21.84	1.31	0.70	0.62	4.04	0.19		5.43	高岭石、伊利石、石英
重庆江北土	52.32	32.76	1.06	0.23	0.46	0.94	0.57		11.55	高岭石、石英
重庆凤白坯土	63.96	22.96	1.64	0.62	0.89	2.54	0.31		6.87	高岭石、伊利石、石英
湖北钟祥土	47.68	37.50	0.65	1.21	0.46	0.72	2.63	1.59	7.84	累托石、水云母、高岭石
南漳软质黏土	49.19	34.69	1.15	0.27	0.14	6.88	1.03	0.33	6.22	伊利石、石英
南漳半软质黏土	47.31	38.14	0.92	0.29	0.12	5.64	1.08	0.92	6.14	伊利石
晋江泥	48.20	28.14	1.85	0.30	0.14	0.53	0.13	1.15	19.64	高岭石
浙江常山叶腊石	71.20	22.71	0.29	0.18	0.31	0.57	0.35		4.35	叶腊石
陕西铜川上店土	46.08	37.62	1.08	0.36	0.15	0.06	0.23	1.36	13.46	高岭石
陕西府谷高岭土	44.25	37.09	0.42	0.45	0.07		0.02	1.03	16.19	高岭石
河南信阳土	71.85	14.48	1.17	3.12	0.35	0.19	0.13	1.61	7.10	蒙脱石、石英
贵州毕节土	68.06	19.60	1.27	0.75	0.90	2.53	0.14		6.65	高岭石、水云母、石英
贵州黔陶毛狗冲土	73.40	16.05	0.24	0.11	2.22		0.12		4.20	蒙脱石、石英、水云母
贵州高坡高岭土	46.42	39.40	0.10	0.09	0.09		0.09	0.10	13.80	多水高岭石
西宁乐都白干土	64.26	22.66	1.50	0.34	0.68	2.42	0.30	1.00	6.92	高岭石、绢云母、石英
广西泥	60.40	26.00	0.45	0.08	0.40	6.64	0.24		5.77	高岭石、伊利石

① 质量分数。

表 4.3-3　　黏土原料的物理性能

原料名称	液限 (%)	最大分子吸水值 (%)	可塑性指数	结合力(MPa)		原料名称	液限 (%)	最大分子吸水值 (%)	可塑性指数	结合力(MPa)	
				纯　土	纯土、砂各 50%					纯　土	纯土、砂各 50%
山西塑州土	38.3	18.5	19.8	4.1	2.8	内蒙东胜土	40.6	21.4	19.2	6.2	3.1
山西左云土	37.8	16.6	21.2	4.2	2.9	内蒙樊家渠土	40.7	18.2	22.5	2.9	2.2
山西广灵土					3.3	内蒙呼市膨润土	101.0	38.3	67.7	无法成型	5.4
山西岳家庄土	30.9	14.6	16.3	2.4	1.1	内蒙竹茨塔土	38.8	20.6	18.3	1.7	1.2
山西杜家庄土	29.7	13.9	15.8	1.9	1.1	内蒙黑碱石	20.2	8.3	11.9	0.46	无法成型
山西大同黏土	20.2	8.3	11.9	0.5	0.3	内蒙达拉子瓷土	29.5	13.6	15.9	3.0	1.8
山西介休高岭石	37.1	17.3	19.8	3.0	2.2	江西小璜瓷土	27.5	12.0	15.5	4.7	3.0
山西介休淘洗土	33.6	13.1	20.5	6.3	3.3	江西星子淘洗土	33.5	17.8	15.7	0.8	无法成型
山西介休李家土	29.7	11.1	18.6	3.3	2.2	江西明砂高岭石	34.8	17.7	16.1	0.4	无法成型
山西介休黑碱土	45.8	17.6	28.2	2.8	2.0	景德镇大洲高岭石	36.4	18.9	17.5	0.3	无法成型
河北宣化瓷土	27.5	10.7	16.8	3.7	2.0	江西南港瓷石	30.9	14.2	16.7	2.1	1.2
河北宣化膨润土	27.4	13.0	14.4	8.3	4.5	江西余干瓷石	31.1	13.3	17.8	3.8	2.2
徐水土	31.0	20.3	9.7	1.67	—	景德镇三宝蓬瓷石	—	—	—	无法成型	无法成型
河北宽城淘洗土	50.3	20.6	29.7	2.7	2.1	江西璠里瓷石	24.6	16.1	8.5	0.9	无法成型
河北沙河县章村土	17.3	10.9	6.4	0.6	无法成型	江西陈湾瓷石	23.9	15.7	8.2	0.9	无法成型
唐山紫木节	39.9	22.0	17.9	2.7	1.6	山东蒙阴土	43.4	21.2	22.2	4.8	2.0
河北新城瓷土	25.3	13.4	11.9	0.5	无法成型	明水黏土	20.0	9.6	11	0.5	0.1
河北改性膨润土	57.3	28.1	29.2	11.9	4.3	烟台黏土	—	—	—	1.4	0.6

续表

原料名称	液限(%)	最大分子吸水值(%)	可塑性指数	结合力(MPa)	
				纯 土	纯土、砂各50%
山东焦宝石	22.1	13.4	8.7	0.3	无法成型
安徽无为黏土	38.8	18.1	20.8	2.8	1.6
湖南醴陵马颈坳瓷石	—	—	20.4	1.1	—
湖南溆浦县黄茅园瓷石	—	—	18.9	1.8	1.1
湖南衡山东糊瓷土	—	—	8.7	1.1	—
湖南衡山永明泥	29.3	15.5	13.8	1.5	0.6
湖南醴陵大林土	35.9	17.6	19.3	1.3	0.7
湖南醴陵沩山土	44.1	17.9	26.2	2.8	1.7
湖南衡山坪田洗泥	39.8	17.2	22.6	1.3	0.6
湖南醴陵茅坡黏土	32.3	13.8	18.5	3.1	2.4
湖南醴陵默然塘黏土	42.6	16.3	26.3	1.3	1.0
湖南衡阳界牌洗泥	42.6	21.7	20.9	1.2	0.8
广东清远县青草岭淘洗土	59.18	29.81	29.37	1.8	1.3
广东东莞二顺黏土	53.3	21.8	31.5	2.1	1.5
广东清远县源潭黏土	74.5	27.5	47.0	2.7	1.2
广东潮安县飞天燕瓷土	39.7	18.2	21.5	0.7	无法成型
广东饶平上山瓷土	27.0	14.6	12.4	0.5	无法成型
广东廉江禾寮土	32.7	19.5	13.2	0.3	无法成型
广东清远浸潭洗泥	38.5	16.9	21.6	3.5	2.1
广东大埔探筒戈黏土	29.1	15.3	13.8	1.1	0.5
广东湛江稼社黏土	—	—	—	0.6	无法成型
河南博爱土	36.0	16.2	19.8	3.0	2.1
河南神后黏土					
河南禹州碱石	22.5	9.7	12.8		
河南汝州黏土	—	—	—	—	1.9
河南南山土					2.8
河南北山黏土					
河南唐河碱石	19.4	8.3	11.1	0.3	无法成型
苏州土2号机选	64.3	30.1	34.2	1.1	0.8
南京皮库山黏土	48.6	23.9	24.7	3.5	2.8
南京其林门土	31.2	14.1	17.1	2.6	1.9
江苏宜兴溧阳膨润土	56.6	29.9	26.7	无法成型	4.1
江苏吴县光福瓷石	23.9	19.2	4.7	0.9	无法成型
无锡阳山白泥	33.0	18.2	14.8	2.1	1.6
福建漳洲黏土	42.2	21.7	20.5	6.7	3.4
福建闽清池园井后黏土	46.4	21.1	25.3	—	—
福建闽清白中保林黏土	27.4	13.9	13.5	—	—

原料名称	液限(%)	最大分子吸水值(%)	可塑性指数	结合力(MPa)	
				纯 土	纯土、砂各50%
福建闽清云际金砂黏土	38.4	20.9	17.5	—	—
福建闽清池园保山黏土	36.3	19.1	17.2	—	—
福建闽清保山厂后黏土	27.2	14.3	12.9	—	—
福建闽清岩前黏土	33.8	18.6	15.2	—	—
福建闽清福斗黏土	37.1	18.0	19.1	—	—
福建闽清白中田中土	37.8	18.8	19.0	—	—
福建闽清池园保新土	42.6	21.1	21.5	—	—
福建闽清庄洋黏土	27.8	15.9	11.9	—	—
辽宁法库黏土	37.7	14.2	23.6	2.5	1.4
辽宁本溪田师傅黏土	19.2	7.5	11.7	0.7	0.2
辽宁本溪红五号黏土	27.3	11.8	15.5	1.1	0.8
辽宁建平黏土	39.4	24.2	15.2	0.4	0.3
辽宁复州黏土	26.87	13.10	13.77	0.3	无法成型
辽宁黑山黏土	130.9	50.9	80.0	—	1.5
吉林舒兰县水曲柳黏土	39.0	13.4	19.7	2.5	2.1
吉林盘石县烟筒山瓷土	19.4	8.3	11.1	0.3	0.1
更刻黏土	30.8	16.9	13.9	1.7	0.8
南票木节土	32.9	17.9	15.0	1.4	1.1
南票B石	28.1	15.7	12.4	0.5	0.4
北票黏土	69.7	34.6	35.1	8.1	4.5
彰武黏土	40.9	18.9	22.2	4.4	2.4
云南建水土	69.3	26.0	43.3	2.9	1.9
四川叙永土	65.3	42.0	23.3	2.9	1.8
四川威远白砂土	—	—	—	无法成型	无法成型
四川威远土	36.3	12.8	23.5	4.2	2.5
重庆江北土	25.6	14.2	11.4	1.2	0.7
重庆凤白坯土	44.3	17.0	27.3	2.0	1.1
湖北钟祥土	64.3	26.5	37.8	5.3	2.6
南漳软质黏土	—	—	—	—	2.4
南漳半软质黏土	—	—	—	—	1.4
晋江泥	45.7	18.2	27.5	3.1	2.2
浙江常山叶腊石	—	—	—	无法成型	无法成型
陕西铜川上店土	25.9	12.8	13.1	0.4	无法成型
河南信阳土	59.7	28.8	30.9	无法成型	4.6
贵州毕节土	41.4	19.1	22.3	3.1	1.8
西宁乐都白干土	34.60	13.70	20.90	5.4	3.5
广西泥	50.7	22.7	28.0	—	0.8

1.3 瘠性原料

瘠性原料系一类不具有可塑性的原料，其作用除了满足坯料化学成分及相应瓷材料机电热性能外，在工艺上，还能够调整坯料的可塑性和结合性，防止干燥及烧成收缩过大而造成的产品变形或开裂。通常，瘠性原料中包括石英、瓷粉、黏土煅烧料等，随着电瓷行业的发展，高铝质原料的使用量不断增加，其在瓷材料中的作用也更加重要，因此，将高铝质原料也纳入瘠性原料的范筹。

1.3.1 石英原料

硅石原料是指所有含二氧化硅的天然矿物，这是一类自然界中储量最多的矿物。它们的存在形式或为单独含 SiO_2 的矿物，或为与其他氧化物结合成各种硅酸盐矿物，石英是硅石类原料中最重要的一种。由于矿山生成条件不同，石英

呈现多种形态，电瓷配方中常用的石英原料为脉石英、石英岩、石英砂等。

(1) 石英原料在坯、釉中的作用及一般技术要求。在坯料中，石英作为瘠性原料有以下特性：可以减少坯体的干燥收缩和弯曲变形，缩短干燥时间；改善泥浆的渗透性，缩短压滤脱水时间；降低坯料的可塑性和结合性；在电瓷产品的烧成过程中，石英的体积膨胀可以补偿黏土的脱水收缩，在高温下部分石英熔解于长石玻璃体中，增大了玻璃体的高温黏度，减少烧成变形；熔有大量石英的玻璃具有较高的力学、电气性能和抗化学腐蚀性；在釉料中，石英可提高釉浆的悬浮性和釉对坯体的附着力；增大釉的高温黏度；增加釉面硬度；降低釉的膨胀系数；提高釉的绝缘性能、化学稳定性及白度和半透明性，改善釉面质量。

石英原料的一般技术要求：

1) 脉石英：Fe_2O_3、CaO、MgO 的含量均小于 0.3%，主要成分 SiO_2>99%。

2) 石英岩：Fe_2O_3、CaO、MgO 的含量均小于 0.5%，主要成分 SiO_2>97%。

3) 石英砂：Fe_2O_3<1%，CaO、MgO 的含量均小于 0.5%，主要成分 SiO_2>86%。

(2) 石英的矿物类型和特性。石英的矿物类型和特性见表 4.3-4。

表 4.3-4　　石英的矿物类型和特性

性能名称	α—石英	β—石英	β—鳞石英	α—方石英	石英玻璃
形成温度(℃)(常压)	573～870	<573	867～1470	1470～1728	
晶系	六方晶系	六方晶系	六方晶系	等轴晶系	各向同性
相对密度	2.53	2.65	2.24	2.22	2.20
形态	菱面体和六方柱聚形体	常见六方双锥	常见假六方板状	常见八面体	

(3) 石英晶形转变的体积变化。石英晶形转变的体积变化见表 4.3-5。

表 4.3-5　　石英晶形转变的体积变化

转　化	温度 (℃)	体积膨胀 (%)
β— 石英⇌β—石英	573	0.82
α— 石英⇌α— 鳞石英	870	16.0
α— 鳞石英⇌α— 方石英	1470	4.7
α— 方石英⇌熔融态石英	1713	0.1
α— 鳞石英⇌β— 鳞石英	163	0.2
β— 鳞石英⇌γ— 鳞石英	117	0.2
α— 方石英⇌β— 方石英	180～270	2.8

(4) 各种石英的化学成分。各种石英的化学成分见表 4.3-6。

表 4.3-6　　各种石英的化学成分①

原料名称	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	IL (%)
江西宜春石英	99.37	0.19	0.26	0.17	0.19				0.07
江西都昌石英	99.23	0.44	0.06	0.24	0.07				0.46
景德镇天宝石英	99.33	0.34	0.06	0.34	0.07				0.36
江西贵溪石英	98.70	0.58	0.07	0.04	0.11	0.09	0.06		0.43
河北芦龙石英	98.52	0.45	0.24	0.40	0.15				0.54
河北曲阳石英	98.98	0.17	0.08	0.69	0.08				0.14
河北新乐石英	99.15	0.30	0.06	0.09	0.06				0.30
河北青龙石英	98.68	0.54	0.15	0.28	0.12				0.17
秦皇岛石英	98.15	0.51	0.13		0.16				0.10
唐山石英	98.54	0.72	0.27	0.37	0.25				
蔺萄石英	98.63	0.04	0.24	0.11		0.05	0.10		0.07
福建上田石英	97.68	3.18	0.07	0.31	0.11				1.53
福建同安石英	97.77	1.07	0.08	0.08	0.06				0.10
福建连城黄坊石英	98.98	0.46	0.35	0.06	0.11	0.31	0.05		0.29
安徽凤阳县黄泥埔石英	99.48	0.30							
安徽芦江县顺岗石英	96.00								
四川威远砂	87.62	7.35	0.27	0.27	0.15	2.55	0.27		1.27
浙江午山砂	86.58	8.65	0.38	0.51	0.22				1.87
浙江湖州石英	97.93	0.50	0.78	0.45	0.32				0.19
浙江釉泉县木岱口石英	97.62	0.59	0.06	0.28	0.16				0.49
安口石英砂	86.28	8.96	0.33	0.24	0.06	2.18			1.98
内蒙乌拉特前旗石英	90.48	5.56	0.68	0.88	0.30	2.00			0.43
内蒙集宁市石英	99.77	0.07	0.01	0.04	0.09	0.08			
内蒙乌达煤矿石英	98.45	1.33	0.08	0.56		0.41			0.40
内蒙乌拉特前旗明安石英	97.12	1.88	0.04	0.31	0.03	0.75			0.44
内蒙包头固阳石英	98.08	0.84	0.34	0.19					

续表

原料名称	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	IL (%)
云南建水砂	97.08	2.05	0.07						
江西星子石英	98.46	0.57	0.18	0.27	0.21				0.26
江西萍乡石英	97.70	0.22	0.50						4.35
山东泰安石英	99.48	0.35	0.10						0.08
河南新安县铁门石英	98.48	0.36	0.10						0.03
河南辉县杨树庄石英	98.55		0.06						0.20
河南唐河石英	98.94	0.43	0.07	0.10	0.05	0.10	0.06		0.21
新疆尾墟县石英	98.07	0.78	0.03						0.40
山西闻喜石英	98.05		0.10						
山西介休石英	99.6		0.01						
山西五台石英	93.99	1.97	0.96	1.65					
湖南临湘石英	99.06	0.26		0.21	0.09	0.15			
湖南长沙石英	99.50	0.10	0.30						
湖南醴陵东堡砂石	88.24	7.50	0.20	0.68	0.48	0.81	0.81		2.53
湖南醴陵栗山坝砂石	89.44	0.63	0.41		0.54	1.24	1.24		2.09
湖南泊罗石英	98.33	0.45	0.06	0.27	0.10				
湖南保靖杰坳砂石	94.34	3.99	0.20	0.28	0.19	0.44	0.44		1.10
湖南湘潭石英	95.31	1.93	0.26	0.39	0.40				1.74
湖南平江石英	99.65			0.06	0.09				
湖南湘乡县石英	99.28		0.30						0.21
辽宁大石桥石英	99.28	0.18	0.21	0.03					
辽宁义县石英	97.085		0.16						0.39
河北古冶燧石	99.07	0.52	0.25						
苏州石英	98.39	0.76	0.29	0.23				0.02	0.42
江苏宿迁石英砂	91.90	4.64	0.21	0.20	0.10				0.24
广东桑浦山石英	99.53	0.19			0.04				
牡丹江西山砂	89.67	9.83	0.38						
云南晋宁石英砂	96.86	2.95	0.17						

① 质量分数。

1.3.2 瓷粉和黏土煅烧料

在电瓷坯、釉中，常采用瓷粉或黏土煅烧料作为瘠性原料。在坯料中，可通过加入瓷粉或黏土煅烧料来调节坯料的可塑性和收缩率，改善瓷坯的烧成性能，增加坯料中 Al_2O_3 的含量，提高产品的机械强度和热稳定性。在釉中，可改善釉浆的流动性，降低釉的高温黏度，有利于坯釉中间层的形成，减少釉针孔。

1.3.3 高铝质原料

电瓷用高铝质原料主要包括两类：煅烧铝矾土和煅烧工业氧化铝。铝矾土是由花岗岩之类的硅酸盐岩石风化而成的，它的矿物组成为水铝石（$\alpha-Al_2O_3\cdot H_2O$）、水铝矿（$\gamma-Al_2O_3\cdot H_2O$）、三水铝石（$\gamma-Al_2O_3\cdot 3H_2O$）、高岭石和伊利石，此外，还含有褐铁矿、针铁矿、锐钛矿或板钛矿、方解石等杂质。根据其矿物组成可分为两种类型：水铝石—伊利石类（D—I 型）铝矾土；水铝石—高岭石类（D—K 型）铝矾土。由于 D—I 型铝矾土中有伊利石的存在（矾土中 K_2O 含量≥1%），导致 D—I 型比 D—K 型铝矾土的煅烧温度要低，D—I 型的最佳烧成温度为 1550℃。需要注意的是，在 1350～1550℃的煅烧范围内，煅烧温度的高低只能改善刚玉莫来石的结晶形态和性质而不能增加结晶的数量。D—K 型铝矾土的最佳煅烧温度为 1650℃。铝矾土在煅烧过程中，随着温度的提高，刚玉莫来石的结晶形态不断完整，气孔减少，矾土逐渐致密；在 1350～1450～1550℃期间，刚玉晶形发生多孔聚合体→它形晶半自形晶→粒、块状半自形晶和粒状、柱状晶体转变，见图 4.3-2（a）～（c）。莫来石形态发生细粒状→针状→柱状转变，见图 4.3-2（d）～（f）。在煅烧时，应尽量按最佳温度烧成，以得到化学反应和收缩作用完全、达到充分烧结、晶体发育完整的铝矾土。从显镜观察可以发现，经 1450℃及以上高温煅烧的铝矾土，其主晶相为刚玉（$\alpha-Al_2O_3$）晶体，还有少量的莫来石、钛酸铝和金红石晶体，总晶相含量约为 90%，另含有约 10%的玻璃相。工业氧化铝是人工制备的氢氧化铝在 1000～1200℃煅烧脱水的产物，其主要晶形为 $\gamma-Al_2O_3$，并含有少量的 $\alpha-Al_2O_3$ 和 $\beta-Al_2O_3$。电瓷坯、釉中所用的煅烧工业氧化铝是工业氧化铝经 1400℃左右煅烧而成，主晶相为刚玉（$\alpha-Al_2O_3$）晶体，$\alpha-Al_2O_3$ 晶粒的形状不一，多以块状、柱状、小圆颗粒状的形式存在，少量 $\alpha-Al_2O_3$ 结晶不完整、无定型、而且在晶粒中带有小气孔，其晶体多以集合体的形式出现，有块状的 $\alpha-Al_2O_3$ 集合体，有柱状的 $\alpha-Al_2O_3$ 集合体，有小圆颗粒状的集合体，也有不同形状的 $\alpha-Al_2O_3$ 集合体聚集在一起，极少数晶粒以单个颗粒存在。少量 $\alpha-Al_2O_3$ 结晶不完整、无定型、而且内带气孔的晶粒。其显微结构见图 4.3-3。

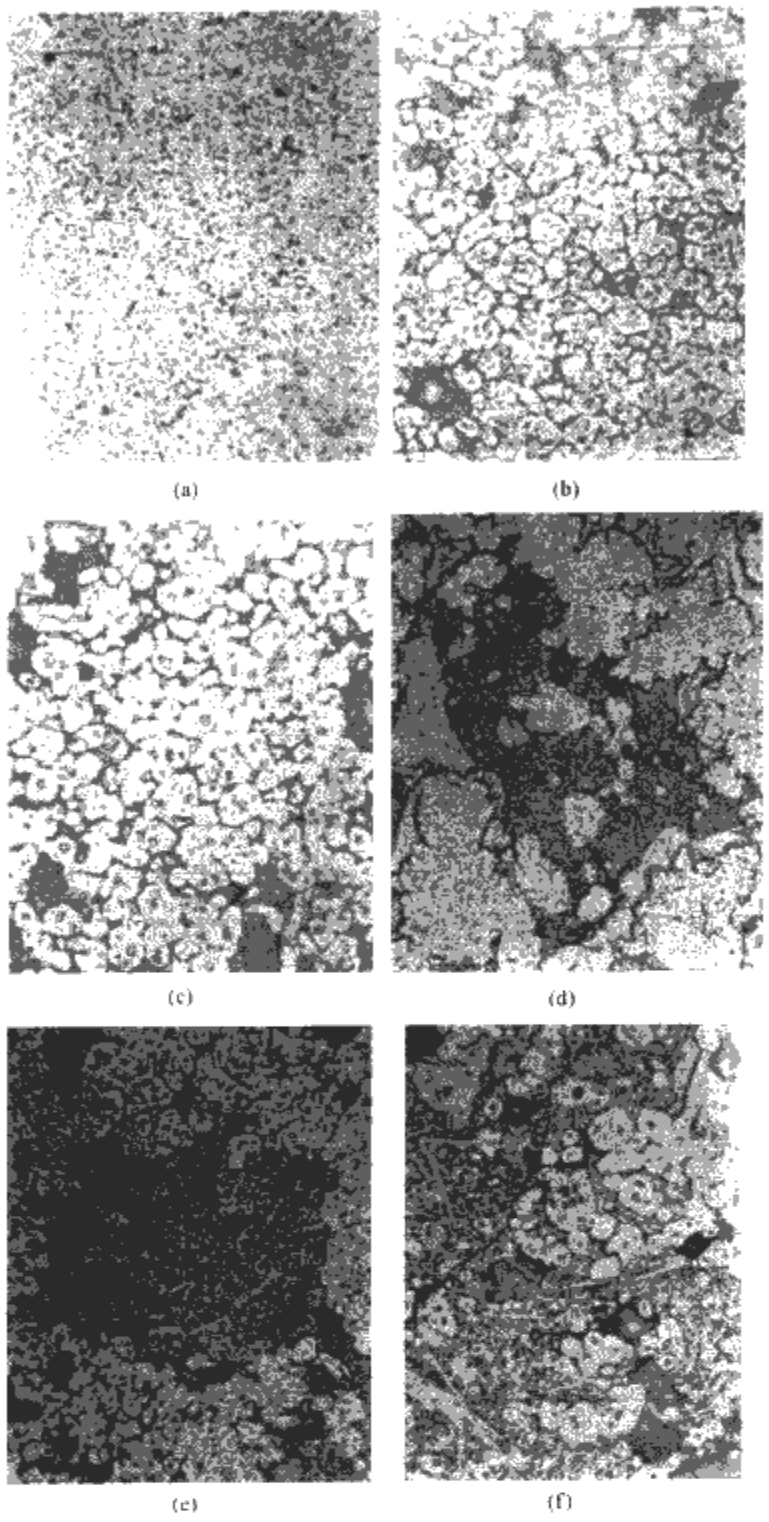


图 4.3-2 铝矾土显微结构

(a) 刚玉聚合体形态；(b) 粒状刚玉形态；
(c) 柱状刚玉形态；(d) 细粒状莫来石形态；
(e) 针状莫来石形态；(f) 柱状莫来石形态

(1) 高铝质原料在坯、釉中的作用及一般技术要求。高铝质原料在坯料中作为瘠性原料，其作用为：可以减少坯体的干燥收缩和弯曲变形，缩短干燥时间；改善泥浆的渗透性，缩短压滤脱水时间；降低坯料的可塑性和结合性；在瓷坯中由于刚玉的引入，使 Al_2O_3 含量有很大的提高，形成了以刚玉、莫来石为主晶相的瓷质结构，显著地提高了瓷材料的各种性能，特别是机械强度性能。试验结果表明，煅烧温度较高的 D—K 型铝矾土，由于其刚玉晶形十分完整且呈柱状自形晶，见图 4.3-4，因此，当其引入电瓷配方后，瓷材料的机械强度较同等含量的 D—I 型铝矾土的瓷材料要高些。在釉中少量引入高铝质原料，可改善釉浆的流动性，提高釉的高温黏度。釉料化学成分中的 Al_2O_3 含量，若有一定的量以刚玉的形式加入，可提高釉玻璃本身的机械强度和热稳定性，有利于上釉瓷材料性能的总体提高。

煅烧铝矾土、煅烧工业氧化铝一般技术要求如下：

1) 煅烧铝矾土。该产品为特级品，$Al_2O_3 \geqslant 85\%$，$Fe_2O_3 \leqslant 1\%$，$TiO_2 \leqslant 4\%$，真密度$\geqslant 3.50 g/cm^3$。

2) 煅烧工业氧化铝。该产品不低于三级品，$Al_2O_3 \geqslant 98.5\%$，$NaO \leqslant 0.6\%$，真密度$\geqslant 3.85 g/cm^3$。

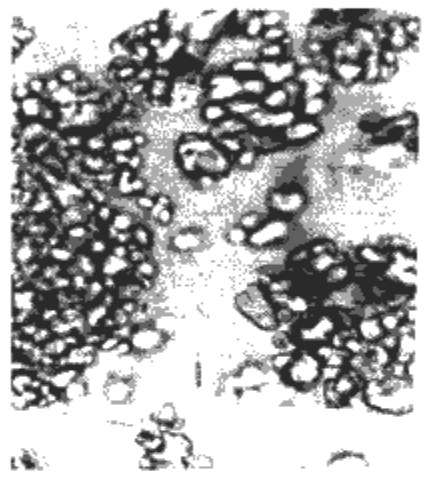


图 4.3-3 工业氧化铝显微结构概貌

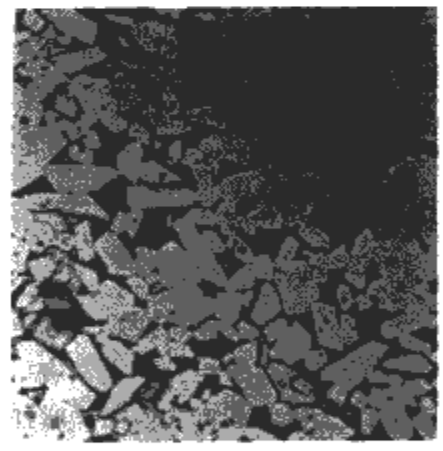


图 4.3-4 铝矾土柱状刚玉形态

(2) 各种高铝质原料的化学成分及真密度。各种高铝质原料的化学成分及真密度见表 4.3-7。

表 4.3-7 各种高铝质原料的化学成分及真密度

原料名称		化学成分①									真密度 (g/cm^3)
		SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	IL (%)	
煅烧铝矾土	河南巩义铝矾土	8.08	85.10	1.04	0.44	0.35	0.63	0.15	3.88	0.14	3.66
	河南禹州铝矾土	7.82	86.23	0.89	0.34	0.25	0.58	0.17	3.57	0.12	3.64
	河南新密铝矾土	7.95	85.59	1.24	0.01	0.40	0.66	0.21	3.87	0.12	3.62
	河南长葛铝矾土	8.34	85.47	1.05	0.33	0.28	0.72	0.18	3.49	0.16	3.61
	山西介休铝矾土	7.10	87.81	0.87	0.40	0.14	0.28	0.03	3.35	0.17	3.71
	山西阳泉铝矾土	8.18	86.24	1.19	0.13	0.12	0.10	0.08	3.87	0.11	3.68
	贵州修文铝矾土	7.34	87.06	0.97	0.11	0.11	0.31	0.19	3.78	0.14	3.69
	河北古冶铝矾土	7.45	87.23	1.15	0.18	0.27	0.11	0.05	3.45	0.12	3.70

续表

原料名称		化学成分①									真密度 (g/cm³)
		SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	TiO_2 (%)	IL (%)	
煅烧工业氧化铝	一级工业氧化铝	0.02	>98.6	<0.03				0.5		<0.8	>3.85
	二级工业氧化铝	0.04	98.5	0.04				0.55		0.8	>3.85
	三级工业氧化铝	0.06	98.4	0.04				0.6		0.8	>3.85

① 质量分数。

1.4 熔剂原料

在电瓷材料中，凡能在较低温度下生成熔融物的原料（如长石），或能与坯、釉中的一些组分，如石英、三氧化二铝等发生化学反应生成低共熔物的原料（如滑石、白云石、石灰石等）称为熔剂原料。

1.4.1 长石原料

长石是一族矿物的总称，在地壳中分布很广。它属架状硅酸盐结构，是一种含碱金属或碱土金属的无水硅酸盐。长石有多种类型，在电瓷配方中主要使用钾长石和钠长石，一般情况下，瓷坯中常用钾长石，其化学式为：$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$，釉料中常用钾长石、钠长石，钠长石的化学式为：$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$。

(1) 长石原料在坯、釉中的作用及一般技术要求。长石作为熔剂原料有以下特点：在坯料中可以降低坯体的烧结温度，使坯体具有较宽的烧结温度范围，降低烧成对组成变化的敏感性；具有熔解石英和黏土的能力，促进瓷坯中莫来石晶体的生成和发育；长石熔质填充坯体气孔，在坯体中形成玻璃相，提高瓷的电气性能和机械性能；可降低坯体的干燥收缩，缩短坯体的干燥性能；在釉料中可以降低釉的熔融温度，增大釉的熔融范围和膨胀系数，提高釉的流动度和光泽度。

钾、钠长石的一般技术要求如下：

1) 钾长石要求 $K_2O + Na_2O > 13\%$，$K_2O/Na_2O > 3$，$Fe_2O_3 < 0.5\%$，$MgO + CaO < 0.6\%$。

2) 钠长石允许含有较高含量的 CaO、MgO，$Fe_2O_3 < 0.3\%$。

(2) 长石的分类及理化性能。长石矿物按化学组成分类可分为：钾长石（$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6Si(O_2)$）、钠长石（$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$）、钙长石（$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$）、钡长石（$BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$）。其主要理化性能指标见表 4.3-8。

(3) 各种长石的化学成分。各种长石的化学成分见表 4.3-9。

表 4.3-8 长石的主要理化性能指标

项目	钾长石	钠长石	钙长石	钡长石
颜色	白、肉红色、灰黄色等	以白为主，有时为红黄铝等	白、灰、黄或红色	
体密度 (g/cm³)	2.56	2.61	2.77	3.45
硬度	6～6.5	6～6.5	6～6.5	6～6.5
晶系	单斜	三斜	三斜	单斜
组成(%)	SiO_2:64.70 Al_2O_3:18.40 K_2O:16.90	SiO_2:68.70 Al_2O_3:19.50 Na_2O:11.80	SiO_2:43.20 Al_2O_3:36.70 CaO:20.10	SiO_2:32 Al_2O_3:27 BaO:40.90
线膨胀系数 (K^{-1})	7.5×10^{-6}	7.4×10^{-6}		
比热容 [kJ/(h·K)]	0.7817～0.7900	0.7942～0.8235	0.8097	
熔融温度 (℃)	1190	1100	1550	1725

表 4.3-9 各种长石的化学成分①

原料名称	SiO_2(%)	Al_2O_3(%)	Fe_2O_3(%)	CaO(%)	MgO(%)	K_2O(%)	Na_2O(%)	IL(%)
湖南临湘长石	65.97	18.75	0.15	0.38		11.92	1.97	0.45
湖南丁字湾长石	64.70	20.90	微量	0.35	0.26	9.20	3.31	0.78
湖南平江长石	63.54	19.17	0.17	0.36	微量	13.79	2.36	0.48
湖南望城长石	63.41	19.18	0.17	0.36	微量	13.79	2.36	0.46
湖南岳阳钠长石	67.55	19.32	0.15	0.75	0.04	0.20	11.56	0.46
湖南岳阳长石	64.28	20.44	0.36	0.83	0.08	14.12		0.28
湖南华容长石	65.21	19.62	0.13	0.32	0.30	14.13		0.28
湖南衡山长石	66.29	20.95	0.02	0.97	0.64	0.90	9.58	0.38
湖南双峰长石	65.35	20.08	0.10	0.08	0.29	8.72	4.91	0.76
湖南淑浦长石	68.39	20.30	0.08	0.25	0.13	0.89	9.74	0.61
湖南湘乡长石	64.98	18.16	0.23	0.78	0.25	11.08	3.49	0.52
湖南兰山长石	62.94	20.53	0.10	0.25	0.18	11.67	2.83	1.23
江西星子长石	65.27	18.41	0.16	0.43	0.21	11.90	3.01	0.72

续表

原料名称	SiO_2(%)	Al_2O_3(%)	Fe_2O_3(%)	CaO(%)	MgO(%)	K_2O(%)	Na_2O(%)	IL(%)
江西贵溪长石	65.00	17.29	0.18	0.84	15.36	0.59		
新疆尾墟长石	65.20	18.70	0.15	0.85	0.05	10.78	4.15	0.40
山东泰安长石	65.47	21.56	0.05	0.76	微量	11.98		0.18
山东莱芜长石	64.70	23.26	0.05	0.60		10.75		0.61
山东莱阳长石	66.10	18.67	0.15	0.69	0.10	12.00	2.24	0.34
山东淄川长石	67.31	17.64	0.21			11.27	2.72	
山西介休长石	64.42	19.60	0.15	0.30	0.06	12.95	2.17	0.54
山西静乐县长石	65.50	19.98	0.28	0.41	0.15	11.32	2.31	0.17
山西代县长石	65.68	18.26	0.31	0.35		12.82	2.61	
山西临县钾霞石	61.98	19.53	0.93	0.56	0.05	15.36	0.53	0.59
山西忻州长石	66.26	18.42	0.17	0.32	0.08	11.68	2.80	0.26
山西闻喜长石	65.80	19.20	0.20	0.86	0.14	11.91	1.52	0.32
河北唐山长石	66.79	18.90	0.30		4.50	7.67	0.89	
河北邢台长石	65.41	18.38	0.23	0.33	0.04	15.60	2.53	0.09
河北秦皇岛长石	65.86	19.88	0.21	0.17	0.39	14.29		
辽宁营口长石	64.34	19.47	0.87	1.37	0.30	11.70	2.25	
辽宁绥中长石	66.48	18.00	0.33	0.36	0.31	11.51	2.49	0.31
辽宁海城长石	65.08	19.52	0.24	0.61		11.19	2.66	0.21
吉林通化长石	66.10	18.49	0.11	0.58	0.40	11.64	2.34	
江苏赣榆长石	64.52	18.93	0.15	0.40	0.20	14.70	0.35	0.25
江苏东海长石	65.21	20.61	0.10	0.35	0.27	13.20		
江苏新沂钾长石	64.98	17.86	0.37	0.37	0.06	13.06	2.62	0.16
江苏新沂钠长石	68.24	19.33	0.08	0.51	0.14	0.18	10.86	0.40
江苏徐州曹林庄长石	64.52	18.93	0.15	0.40	0.20	14.70	0.35	0.20
广东揭阳长石	63.19	21.77	0.44	0.48	0.30	12.46	0.42	1.42
广东阳江长石	66.75	17.88	0.28	1.45	0.26	12.48		1.08
广东莱芜长石	64.71	23.28	0.45	0.60		10.48		0.60
广西长石	72.61	15.10	0.30	0.10	0.15	10.66	0.96	
广西资源县长石	65.91	17.89	0.21	0.34	0.20	13.96		0.77
河南卢氏县长石	66.70	17.65	0.19	0.45	0.37	11.62	2.86	0.18
河南滩池长石砂岩	76.98	11.74	0.20	0.28	0.30	10.25	0.13	
河南安阳钠长石	67.90	17.30	0.19	3.46	1.25	4.20	5.71	
河南光山县王岗长石	65.41	20.47	0.15	0.25		15.07		0.16
内蒙乌拉特前旗长石								
内蒙包头长石	65.02	19.30	0.09			12.22	1.47	
陕西商南县长石	66.89	18.62	0.20	0.38	0.23	11.23	2.44	0.21
陕西洛南长石	64.48	19.00	0.25	0.26		10.06	0.76	0.26
云南个旧长石	66.42	18.55	0.29	0.45	0.43	8.93	3.54	1.76
江西星子长石	65.13	19.60	0.60	0.21	0.05	6.67	7.40	0.68
江西景德镇天宝长石	61.27	22.02	0.09	0.08	0.13	13.22	0.53	2.41
湖北通城县北港长石	64.36	18.79	0.30	0.16		11.75	3.32	0.24

① 质量分数。

1.4.2 其他熔剂原料

其他熔剂原料是指能与坯、釉中的一些组份发生化学反应生成低共熔物的原料，电瓷常用的原料主要有滑石、白云石、石灰石、方解石、碳酸钡。它们在坯、釉中的作用及一般技术要求见表4.3-10。

表4.3-10 其他熔剂原料在坯、釉中的作用及一般技术要求

原料名称	在坯釉中的作用	主要化学式及一般技术要求
滑石	在电瓷釉中，以生滑石形式引入可提高釉浆的悬浮性；以熟滑石引入可降低釉面气泡和针孔；滑石可降低釉玻璃的膨胀系数，提高釉玻璃的弹性和热稳定性，拓宽釉的烧成温度范围。电瓷坯料很少使用	主要化学式：$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ 一般技术要求：MgO≥30%，Fe_2O_3≤0.3%
白云石	在电瓷釉中，可降低釉的烧成温度、高温黏度；降低釉玻璃的膨胀系数；提高釉玻璃的光泽度和弹性，有利于坯釉牢固结合以及色剂的呈色。电瓷坯料很少使用	主要化学式：$CaCO_3 \cdot MgCO_3$ 一般技术要求：MgO≥20%，CaO≥30%，IL≤47，Fe_2O_3≤0.2%
石灰石	在电瓷釉中，可降低釉的烧成温度、高温黏度，提高釉玻璃的光泽度和弹性，有利于坯釉牢固结合以及色剂的呈色。电瓷坯料很少使用	主要化学式：$CaCO_3$ 一般技术要求：CaO≥51%，IL≤45，Fe_2O_3≤0.4%
方解石	在电瓷釉中，可降低釉的烧成温度、高温黏度；提高釉玻璃的光泽度和弹性，有利于坯釉牢固结合以及色剂的呈色。电瓷坯料很少使用	主要化学式：$CaCO_3$ 一般技术要求：CaO≥54%，IL≤45，Fe_2O_3≤0.2%
碳酸钡	在电瓷釉中，在高温下分解的BaO比其他碱土具有更强的熔剂作用，可显著降低釉的烧成温度，改善釉的高温流动度，降低长石釉的龟裂倾向，提高釉玻璃的光泽度，有利于色剂的呈色。在电瓷瓷坯中，可降低烧成温度，使坯体具有较宽的烧成温度范围；大幅度地提高瓷材料的体积电阻率，对材料的直流性能有较大的提高	主要化学式：$BaCO_3$ 一般技术要求：工业纯度，$BaCO_3$≥99.00%
氧化锌	在电瓷釉中为一种强熔剂，可极大地降低釉的膨胀系数及烧成温度，改善釉的高温流动度；具有一定的乳浊效果；在钴蓝系天蓝釉中，可通过加入量来调节颜色的深浅；在电瓷瓷坯中，可降低烧成温度，增加坯体的烧成温度范围；对瓷材料的机械强度有极大的提高	主要化学式：ZnO 一般技术要求：工业纯度，ZnO≥99.7%

1.5 其他原料

电瓷釉料配方中，由于釉的特殊需要，常采用一些着色剂、乳浊剂以及半导体釉用导体材料，它们在釉中的作用及一般技术要求见表4.3-11。

表4.3-11 其他原料在釉中的作用及一般技术要求

原料名称	在釉中的作用	主要化学式及一般技术要求
氧化铁	在棕釉中，常作为着色剂；在半导体釉中，是铁型半导体釉的主要材料	主要化学式：Fe_2O_3 一般技术要求：Fe_2O_3≥95%
氧化铬	在棕釉和绿釉中，常作为着色剂使用	主要化学式：Cr_2O_3 一般技术要求：Cr_2O_3≥90%
氧化锰	在棕釉中，常作为着色剂使用	主要化学式：MnO_2 一般技术要求：MnO_2≥60%
氧化钴	在天蓝釉中，常作为钴兰颜料的着色剂使用	主要化学式：CoO 一般技术要求：以钴含量计≥70%
五氧化二钒	在天蓝釉中，常作为钴钒兰颜料的着色剂使用	主要化学式：V_2O_5 一般技术要求：$V_2O_5 + V_2O_4$≥99.4%
氧化锆	在天蓝釉中，常作为钴钒兰颜料的载体使用；在乳浊釉中，常作为乳浊剂使用	主要化学式：ZrO_2 一般技术要求：ZrO_2≥99.4%
硅酸锆	在乳浊釉中，常作为乳浊剂使用	主要化学式：$ZrO_2 \cdot SiO_2$ 一般技术要求：ZrO_2≥63%
氧化钛	在半导体釉中，是铁型半导体釉和钛型半导体釉的主要原料	主要化学式：TiO_2 一般技术要求：TiO_2≥98%
二氧化锡	在半导体釉中，是锡—锑型半导体釉的主要原料。在乳浊釉中，常作为乳浊剂使用。在天蓝釉中，可用于加强呈色	主要化学式：SnO_2 一般技术要求：SnO_2≥98%

2 坯釉砂配方

电瓷配方是电瓷生产的关键环节之一，是根据产品对瓷材料性能的基本要求，结合工艺设备及可使用的各种原材料的理化性能指标，通过设计与试验，确定所需的原料种类及其用量，制定出的能够满足坯、釉料工艺性能和瓷材料机、电、热性能要求的坯、釉配方。

2.1 坯料

电瓷坯料的矿物组成配方属于三成分陶瓷系列，一种为硅质瓷坯料配方，它包括普通硅质瓷坯料配方、石英质瓷坯料配方，其配方由长石、石英、黏土等基本矿物原料构成；另一种为铝质瓷坯料配方，它是在配方矿物组成中用高铝质原料部分或全部替代硅质瓷坯料配方中的石英原料。瓷材料按化学成分、性能分类，共分为5类：C110、C111系列普通硅质瓷，C112方石英瓷，C120铝质瓷，C121铝质瓷，C130铝质瓷。

2.1.1 坯料的矿物组成

坯料配方的矿物组成范围如表4.3-12所示。

表4.3-12 坯料配方的矿物组成范围

配方种类	矿物(%)				备注
	黏土	石英	长石	铝矾土	
普通硅质瓷	45～60	20～30	20～30	—	C110,C111
方石英瓷	45～55	30～35	18～20	—	C112
铝质瓷	45～55	15～20	18～25	3～12	C120
铝质瓷	45～55	5～15	15～20	15～25	C121
铝质瓷	42～50	—	10～20	35～45	C130

在各类配方中引入少量的氧化锌原料（2%～5%），可减少长石用量，降低瓷质显微结构中的玻璃相含量（可降到40%左右），改善瓷质结构，提高电瓷材料的机械性能。另外，引入少量（1%左右）的 B_2O_3、TiO_2、MnO_2、Cr_2O_3 等亦可达到改善瓷质的均匀性，提高电瓷的机电性能的目的。在配方中引入 1.5%～4%的碳酸钡原料，可改善瓷材料在直流条件下的电气性能，提高体积电阻率，同时亦可减少配方中长石的用量。为了调节工艺性能和提高瓷质机械强度，在一些配方中可引入不超过 15%的废瓷粉。在 C121 铝质瓷配方中，可以根据情况不使用石英原料。

2.1.2 坯料化学成分

对于电瓷坯料配方，不仅其矿物组成要符合要求，而且在化学成分上也要合适，只有这样才能使坯料的工艺性能好，瓷的性能好。坯料的化学成分范围见表 4.3-13。

表 4.3-13 坯料的化学成分范围

配方种类	化学成分（%）				
	SiO_2	Al_2O_3	K_2O+Na_2O	Fe_2O_3	$CaO+MgO$
普通硅质瓷	66～72	18～24	3.5～5.0	<1.0	<1.0
方石英瓷	72～75	20～23	2.5～3.0	<1.0	<1.0
C120 铝质瓷	58～69	22～29	3.0～4.5	<1.0	<1.0
C121 铝质瓷	43～56	30～44	3.0～4.5	<1.0	<1.0
C130 铝质瓷	33～43	45～55	3.0～4.5	<1.0	<1.0

坯料配方的矿物组成和化学成分确定之后，应先经过试验确定泥料加工细度、成型水分和烧成温度等工艺参数，最后按确定的工艺参数进行生产试验，直到获得满意的结果。

2.1.3 主要物理性能

（1）坯料的可塑性能。坯料的可塑性能见表 4.3-14。

表 4.3-14 坯料的可塑性能

配方种类	可塑性指标		可塑性指数
	可塑性指标	相应含水率（%）	
普通硅质瓷	4～7	18～24	12～23
方石英瓷	4～7	18～22	14～18
C120 铝质瓷	4～7	18～24	12～21
C121 铝质瓷	4～7	18～24	12～18
C130 铝质瓷	4～7	19～24	12～22

（2）坯料的干燥性能。坯料的干燥性能见表 4.3-15。

表 4.3-15 坯料的干燥性能

配方种类	干燥线收缩率（%）	干燥体积收缩率（%）	临界水分（%）	干燥弯曲强度（MPa）	吸湿弯曲强度（MPa）	
					强度值	相应含水率（%）
普通硅质瓷	5～8	12～17	10～13	3～8	2～3	1.0～2.2
方石英瓷	5～6	12～15	9～11	4～8	2～3	1.0～2.2
C120 铝质瓷	4～8	12～17	9～11	4.5～8	2～3	1.0～2.2
C121 铝质瓷	4～8	11～14	9～11	4.5～7.5	2～3	1.0～2.2
C130 铝质瓷	4～7	10～17	8～11	4.5～7.5	2～3	1.0～2.3

（3）烧成性能。坯料的烧成性能见表 4.3-16。

表 4.3-16 坯料的烧成性能

配方种类	烧成线收缩率（%）	烧成体积收缩率（%）	总线收缩率（%）	总体积收缩率（%）	烧成温度范围（℃）
普通硅质瓷	6～9	20～30	11～15	35～40	30～60
方石英瓷	6～8	24～27	11～14	32～37	20～30
C120 铝质瓷	6～11	21～32	11～15	31～41	30～60
C121 铝质瓷	7～11	23～30	11～15	32～40	40～60
C130 铝质瓷	6～11	23～32	12～15	34～42	40～60

2.2 釉料

釉是覆盖在瓷表面上的一层玻璃态物质，厚度为 0.2～0.3mm。电瓷制品上釉后，使制品的机械强度提高 15%～35%，使制品的热稳定性得到改善；釉能够使瓷表面光滑美观，便于风雨清洗，提高其抗污秽能力，从而改善电瓷的电气性能，提高表面的放电特性。但并不是所有的釉都能起到有益的作用，当它的性能与瓷坯不相适应时，反而会降低瓷的机、电、热性能。为了使釉能够起到良好的作用，通常对其在配制方面和性质方面有以下几点要求：

（1）原料应选择纯度较高的天然原料和少量的化工原料。熔融温度低于 1000℃以下的低熔点物质和可溶性盐类禁止直接用于釉中。

（2）釉浆应具有适当的黏度、良好的悬浮性能和对坯体的附着性，施釉后坯体能尽快的干燥。

（3）釉的熔融温度应与瓷坯的烧成温度相一致，釉的烧成温度范围应不小于 1030℃，开始熔化温度应不低于 1150℃。

（4）釉应具有较好的高温流动度，使烧后釉面光滑。

（5）釉的膨胀系数应略小于瓷坯的膨胀系数，并在坯、釉之间形成良好的中间层，以提高上釉瓷件的机械强度和抗张能力。试验表明：当釉的线膨胀系数比瓷的线膨胀系数小（1.0×10^{-6}～2.0×10^{-6}）K^{-1}时，可提高瓷试样弯曲强度达 10%以上。

（6）釉应具有足够的抗张强度和表面硬度，并具有一定的弹性。

（7）釉应具有良好的化学稳定性和高的表面电阻率。

白釉和棕釉是电瓷广泛应用的两种釉。此外，还有天蓝釉、乳浊釉和半导体釉。

2.2.1 白釉

白釉配方是按矿物组成和化学分析结合起来综合设计的，它是以长石、滑石、石灰石作为主要熔剂原料，以石英作为引入 SiO_2 的主要来源。为了使釉浆保持适宜的悬浮性和粘性，引入了一定量的黏土，一般用量不低于 10%。为了提高圆柱头盘形悬式绝缘子产品头部的机械性能，产品头部上釉采用头部釉。头部釉是一种线膨胀系数较小的釉，其 20～600℃的 α 值是$(3.0\sim4.0)\times10^{-6}K^{-1}$（其他釉的 α 值一般在 $3.5\times10^{-6}1/K\sim5.5\times10^{-6}K^{-1}$ 的范围内），比瓷的 α 值$(5.0\sim6.0)\times10^{-6}K^{-1}$要小的多，被认为是良好的压缩釉。这种釉的熔块料由长石、石英、滑石、黏土等原料经混合、细磨、烧制而成。熔块粉碎后，与长石、石英、滑石、黏土、石灰石等原料制备成头部釉浆料。该釉低 α 值的主要原因是在其化学成分中含有较高的 MgO 含量，MgO 当量分子数在 0.6 左右，使其正好位于 MgO—CaO—SiO_2 三元系统

相图中的堇青石结晶区域，便于堇青石晶粒的生成。白釉、头部釉的矿物组成范围见表 4.3-17，化学成分范围见表 4.3-18。

表 4.3-17 白釉的矿物组成范围 %

原料种类	长石	石英	黏土	石灰石	滑石	熔块料
白釉	30～40	25～35	10～25	5～8	7～13	
头部釉	20～30		10～20	3～5	3～5	45～55

注 熔块料由长石、石英、滑石、黏土经混合、细磨、烧制而成。

表 4.3-18 化学成分范围 %

釉的名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O+Na_2O
白 釉	62～73	12～16	<0.5	2.9～4.4	2.4～4.5	5.0～6.2
头部釉	62～66	20～23	<0.5	2.0～3.5	5.0～6.0	5.0～6.0

白釉配方的矿物组成中，长石可用单一的钾长石，也可使用钾长石和钠长石两种矿物；方解石可取代石灰石；白云石可全部或部分取代石灰石和滑石。配方中有时还可外加10%～20%的瓷粉或坯泥，可加入 1%～3%的煅烧氧化锌，1%～5%的碳酸钡等化工原料，以改善釉与坯的烧成结合性、釉的白度和光泽度。为了提高釉的三氧化二铝的含量，提高釉的烧成温度及机械性能，可在釉中引入 2%～6%的铝矾土或工业氧化铝。

2.2.2 棕釉

棕釉是在白釉的基础上加入 6%～10%的棕色色剂配制而成的，色剂一般采用工业氧化铁、工业氧化铬、工业氧化锰等化工原料。棕釉的矿物组成范围见表 4.3-19，化学成分范围见表 4.3-20。

表 4.3-19 棕釉的矿物组成范围 %

原料种类	长石	石英	黏土	石灰石	滑石	氧化铁	氧化铬	氧化锰
棕 釉	28～38	25～33	10～25	6～10	1～6	1.0～2.5	1.0～2.5	4～7

表 4.3-20 化学成分范围 %

釉的名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O+Na_2O	Cr_2O_3	MnO_2
棕 釉	62～72	11～15	1.3～3.2	3.0～6.0	0.5～2.0	4.0～6.5	1.0～2.5	2.5～4.5

在棕釉配方的矿物组成中，与白釉一样可使用钾、钠长石、方解石、白云石、瓷粉、坯泥、铝矾土、工业氧化铝等原料。碳酸钡的少量加入，可较好地提高成色的均匀性和光泽度，大幅度地减少长石的用量（可降到 22%左右）。另外，在配方中还应减少含镁矿物，如滑石等的用量；提高含钙矿物，如方解石、石灰石等的用量，以获得较好的光泽。在色剂使用上，除可采用化工原料如：工业氧化铁、工业氧化铬、工业氧化锰外，还可采用含铁量高的黏土，以全部或部分代替工业氧化铁，并可取代一部分釉用黏土。铬铁矿也可取代工业氧化铬和工业氧化锰。

2.2.3 天蓝釉

天蓝釉是在白釉的基础上加入少量的色剂和乳浊剂配制而成。电瓷用色剂主要分为钴系色剂、钒锆系色剂。钴系色剂由氧化铝、氧化钴、氧化锌等原料经配制、煅烧而成；钒锆系色剂由氧化锆、氧化钒、氟化钠、石英等原料经配制、煅烧而成；乳浊剂一般为氧化锆、锆英砂、氧化锡等。天蓝釉的矿物组成范围见表 4.3-21，天蓝釉色剂的原料组成范围见表 4.3-22。

表 4.3-21 天蓝釉的矿物组成范围 %

原料种类	长石	石英	黏土	石灰石	滑石	色剂	乳浊剂
天蓝釉	30～40	20～30	10～25	3～7	5～10	1.5～8	2～6

表 4.3-22 天蓝釉色剂的原料组成范围 %

色剂种类	氧化铝	氧化钴	氧化锌	氧化铬	石英	氧化锆	氧化钒	氟化钠
钴蓝系	50～80	10～30	0～20	0～15				
钒锆蓝系					30～35	60～65	0.5～1.5	3～7

天蓝釉配方的矿物组成中，用于白釉的其他原料亦可用于天蓝釉中，其作用也基本相当；在色剂使用上，钴蓝系色剂、钒锆蓝系色剂可单独使用，也可根据情况混合使用。

2.2.4 半导体釉

半导体釉的表面电阻系数为 10^6～$10^8\,\Omega$。其电阻随温度升高而降低。公式如下：

$$R = R_0 e^{B/T} \tag{4.3-1}$$

式中：R 为温度为 T（K）时的电阻，Ω；R_0 为温度为 T_0（K）时的电阻，Ω；B 为材料的热敏电阻常数，K。

或表示为

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \tag{4.3-2}$$

式中：α 为表面温度系数，$℃^{-1}$。

式（4.3-2）表明半导体釉具有负的电阻温度系数。为了简便起见，常用电阻减小一半时所需的温升，及 $\Delta t_{0.5R}$ 来表示半导体釉的这种特性。

对污秽地区的绝缘子表面涂上半导体釉，由于泄漏电流的发热效应，可以起到烘干潮湿的作用，防止污闪，延长清扫周期。此外，可以改善绝缘子的电场分布，提高电晕电压，防止无线电干扰。

半导体釉在绝缘子上虽然起到许多好的作用，但是如果 $\Delta t_{0.5R}$ 太小，当夏季温度较高时，釉的电阻会变得很小，则因泄漏电流的发热效应可能引起绝缘子炸裂；在冬季电阻变大，因泄漏电流过小致使引发的热效应太小，有时起不到烘干潮湿的作用。

半导体釉一般是由 70%左右的白釉和 30%左右的金属氧化物或预先合成的导电性化合物配置而成的。这些金属氧化物在一定的烧成条件下，在玻璃相中生成具有导电性的固熔体或尖晶石晶体。

电瓷用半导体釉有：Fe_2O_3—TiO_2，Fe_2O_3—TiO_2—Cr_2O_3，TiO_2，SnO_2—Sb_2O_5 等 4 种类型。Fe_2O_3—TiO_2 型半导体釉和 Fe_2O_3—TiO_2—Cr_2O_3 型半导体釉已应用于电瓷产品。为了增大 $\Delta t_{0.5R}$，提高机械强度和釉面外观质量，SnO_2—Sb_2O_5 型比 Fe_2O_3—TiO_2—Cr_2O_3 型半导体釉优越。以氧化铁为主的铁型釉的 $\Delta t_{0.5R}$ 为 20～30℃；钛型釉的 $\Delta t_{0.5R}$ 为 50～60℃；锡锑型釉的 $\Delta t_{0.5R}$ 为 70～80℃。

Fe_2O_3—TiO_2 型半导体釉和 Fe_2O_3—TiO_2—Cr_2O_3 型半导体釉的矿物组成范围见表 4.3-23，化学成分范围见表 4.3-24。

表 4.3-23 Fe_2O_3—TiO_2 型、Fe_2O_3—TiO_2—Cr_2O_3 型釉的矿物组成范围 %

原料种类	长石	石英	黏土	石灰石	滑石	导电氧化物（Fe、Ti、Cr）
半导体釉	15～30	20～30	10～20	5～10	5～10	25～35

表 4.3-24 Fe_2O_3—TiO_2型、Fe_2O_3—TiO_2—Cr_2O_3型釉化学成分范围 %

釉的名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	BaO	TiO_2	Cr_2O_3
铁钛型釉	50～54	8～10	9～16	0.5～4	0.5～3.5	1.5～2.5	0.5～1.5	0～3.8	8～17	
铁钛铬型釉	48～60	6～9.5	10～16	0.5～5.3	0.5～4	2～3	0.5～1.5	0～3.8	7～10	3～6

在半导体釉配方的矿物组成中，与白釉一样可使用钾、钠长石、方解石、白云石、瓷粉、坯泥、铝矾土、工业氧化铝等原料，其作用也基本相当。

2.2.5 乳白釉

乳白釉具有不透明性和较强的覆盖性，能提高产品的白度。乳白釉是在白釉的基础上，加入一定量的乳浊剂配制而成。乳浊剂种类很多，在电瓷釉中，常使用稳定性较好，能经受高温和气氛的变化的锆英石原料。

乳白釉的乳浊度与下列因素有关：

（1）乳浊剂的折射率与釉玻璃的折射率差值越大，乳浊效果越好。

（2）乳浊剂用量越大，釉的乳浊度越高。当需要在釉中引入较多的乳浊剂时，为了改善釉浆性能，最好将乳浊剂微粉提前进行预烧。

（3）乳浊剂含量一定，当其粒径为 0.4～0.75μm 时，釉的乳浊度为最高。

（4）釉层越厚，釉中乳浊剂分布越均匀，釉的乳浊效果越好。

（5）工业氧化铝的少量引入，可提高釉化学成分中的三氧化二铝的含量，降低锆英石的熔解度，有利于提高釉子的乳浊度和机械强度。

（6）用工业氧化锌替代部分石灰石时，对提高釉子的白度有利。

乳白釉原料组成范围见表 4.3-25。

表 4.3-25 乳白釉的矿物组成范围 %

原料种类	长石	石英	黏土	石灰石	滑石	碳酸钡	氧化铝	氧化锌	乳浊剂
乳白釉	28～38	17～30	4～25	2～7	4～12	1～10	0～5	0～4	8～16

在乳白釉配方的矿物组成中，与白釉一样可使用钾、钠长石、方解石、白云石、瓷粉、坯泥、工业氧化铝等原料，其作用也基本相当。

2.2.6 釉料的主要性能

电瓷坯釉烧成温度区间以三角锥表示，一般在 1300～1350℃的范围内，电瓷釉的主要性能为耐火度、高温流动度、平均线膨胀系数、表面电阻率等性能。其主要性能指标见表 4.3-26。

表 4.3-26 釉料的主要性能

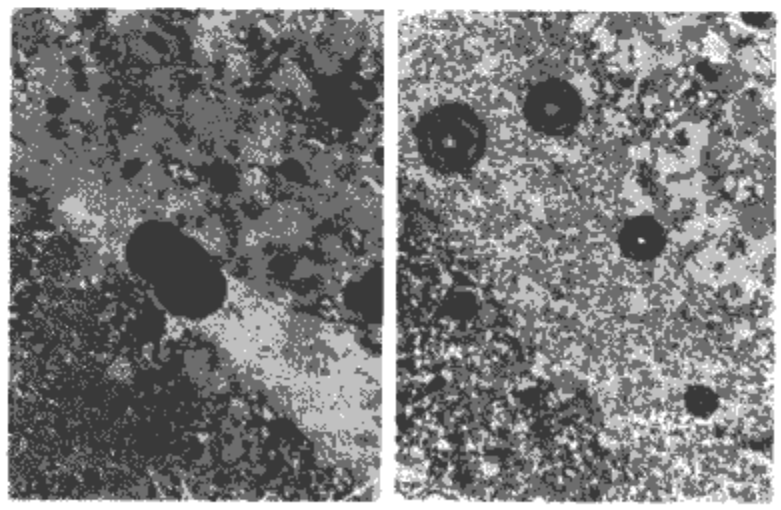
釉料种类	耐火度（℃）	高温流动度（mm）（平板法）	平均线膨胀系数(K^{-1})（20～600℃）	表面电阻率(Ω)（相对湿度 70%）	釉面莫氏硬度	光泽度（%）
白釉	1150～1200	50～65	$(3.5\sim4.5)\times10^{-6}$	$\geqslant10^{12}$	6.5～7.5	>70
棕釉	1120～1170	55～70	$(3.5\sim5.0)\times10^{-6}$	$\geqslant10^{12}$	6.5～7.5	>70

续表

釉料种类	耐火度（℃）	高温流动度（mm）（平板法）	平均线膨胀系数(K^{-1})（20～600℃）	表面电阻率(Ω)（相对湿度 70%）	釉面莫氏硬度	光泽度（%）
天蓝釉	1180～1220	50～60	$(4.0\sim5.0)\times10^{-6}$	$\geqslant10^{12}$	6.5～7.5	>70
半导体釉	1220～1280	50～60	$(4.5\sim5.5)\times10^{-6}$	$10^{6}\sim10^{8}$	6.5～7.5	>70
乳白釉	1150～1220	40～55	$(3.0\sim4.5)\times10^{-6}$	$\geqslant10^{12}$	6.5～7.5	>70
头部釉	1180～1220	50～60	$(3.0\sim4.0)\times10^{-6}$	$\geqslant10^{12}$	6.5～7.5	>70

2.3 瓷砂料

瓷砂用于电瓷产品的胶装部位，使其形成粗糙面，与水泥胶合剂胶合在一起承受和传递机械力。瓷砂材料总体上分为本坯瓷砂和特种瓷砂两种类型。本坯瓷砂是用生产瓷坯的料制作而成的，其化学成分、线膨胀系数等性能与瓷坯完全相同。特种瓷砂是专门配制的，配方中由于引入了镁质原料，其性能与瓷坯有一定的差别，特种瓷砂分为 3 种料别。在瓷砂的显微结构中，对于本体瓷砂—釉—瓷体系，它们三者交界面呈现出清晰的分界线，釉如同是本体瓷砂与瓷坯二者之间的夹心物，同时体现出采用本体瓷砂的电瓷试样弯曲强度不但不会提高，有时还会大幅降低，最大可降低到 35%。对于特种瓷砂—釉—瓷坯体系，显微结构显示了瓷砂与釉、釉与瓷坯的交界面充分扩散反应，分别在二者之间形成一条很宽的中间过渡带，见图 4.3-5，该过渡带的存在对于瓷的机械强度非常有利。另外，根据国内外的经验可得出：要充分发挥瓷材料的强度作用，瓷产品所施釉的线膨胀系数 α 值和粘在其上的瓷砂 α 值必须相互匹配，两者还要与瓷的 α 值相匹配，三者的关系是瓷 α＞瓷砂 $\alpha\geqslant$釉 α。在烧制过程中，釉和砂应相互反应，形成犹如一体的釉砂层，由于瓷砂 α 与釉 α 相接近，它们之间的应力可以降至最小。因瓷 α 大，烧制冷却时收缩大于釉，也大于瓷砂，可使釉砂层处于压缩应力的状态。研究表明：当瓷砂、釉 α 比瓷 α 小 $(1.0\sim2.0)\times10^{-6}K^{-1}$ 时，上砂上釉的瓷材料试样弯曲强度可提高 20% 以上。



(a) (b)

图 4.3-5 瓷釉砂交界面显微结构概貌
(a) 瓷（左下）、白釉（中）、砂（右上）；
(b) 瓷（左下）、头部釉（中）、砂（右上）

瓷砂材料的配方组成和电瓷材料一样，由长石、石英、黏土等矿物原料为主。为了使瓷砂 α＜瓷 α，可在配方的矿物组成中引入含镁的原料或化工原料，如滑石、镁质黏土或工业碳酸镁等，以便于在瓷砂显微结构中生成堇青石晶体；为了使瓷砂具有一定的强度，可在组成中一般使用大量黏土，或加入高铝原料。瓷砂的矿物组成范围、相应的化学组成范围及主要性能分别见表 4.3-27、表 4.3-28、表 4.3-29，其显微结构概貌见图 4.3-6。

表 4.3-27　　瓷砂的矿物组成范围　　%

砂料类别	长石	石英	黏土	煅烧原料		滑石	镁质黏土	工业碳酸镁
				黏土	铝矾土			
Ⅰ	10～20	10～30	60～70	—	—	—	—	4～8
Ⅱ	15～20	5～10	30～60	0～30	—	—	10～15	—
Ⅲ	10～15	10～15	45～55	—	8～20	8～12	—	—

表 4.3-28　　瓷砂的化学组成范围　　%

砂料类别	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O+Na_2O
Ⅰ	63.0～67.0	21.0～28.0	＜1.0	＜1.0	＜0.5	2.0～4.0	3.5～5.0
Ⅱ	60.0～63.0	30.0～32.0	＜1.0	—	＜0.5	3.0～3.5	3.5～4.0
Ⅲ	53.0～63.0	30.0～37.0	0.6～1.2	＜1.0	＜0.5	3.3～3.8	3.0～3.7

表 4.3-29　　瓷砂的主要性能

砂料类别	玻化温度范围（℃）	弯曲强度（MPa）	平均线膨胀系数（1/K）	冷热急变性（K）	上釉上瓷砂后	
					瓷弯曲强度（MPa）	瓷强度提高（%）
Ⅰ	1230～1260	90～110	(3.7～4.0)×10^{-6}	190～200	130～200	20～40
Ⅱ	1260～1280	80～90	(3.5～4.5)×10^{-6}	200～210	130～200	20～40
Ⅲ	1240～1300	95～105	(3.5～4.5)×10^{-6}	≥170	180～220	26～37

2.3.1　矿物组成方面

Ⅰ号瓷砂和Ⅱ号瓷砂中的黏土总量（含煅烧黏土）多，并引入了镁质黏土或工业碳酸镁，使瓷砂显微结构中含有很多莫来石结晶相和一定量的堇青石结晶相，这两种结晶相有利于降低瓷砂 α；Ⅲ号瓷砂中主要用滑石原料，含量约 10% 左右，使瓷砂显微结构中含有较多的堇青石结晶相，从而降低了瓷砂 α。

2.3.2　性能方面

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号瓷砂材料均含镁质原料，MgO 在瓷砂组成中是熔剂成分之一，促使瓷砂材料的玻化温度降低，分别起始于 1230～1260℃。已知电瓷的玻化温度一般起始于 1300℃左右，因此，被釉粘在坯体上的瓷砂在烧成过程中，有利于瓷砂与釉有充分的时间相互扩散和反应，形成犹如一体的瓷砂釉层，以提高瓷件机械强度。3 种瓷砂材料的试样弯曲强度都具有 80～105MPa 的水平，这样的强度水平对于Ⅰ、Ⅱ号瓷砂而言，在很大程度上与配方中黏土含量有关；对于Ⅲ号瓷砂是因为在配方中引入了煅烧铝矾土，镁质黏土赋予瓷砂显微结构中有相当数量的莫来石结晶相，煅烧铝矾土则因存在刚玉结晶及富铝玻璃相而得到加强。瓷砂 α 为 (3.5～4.5)×$10^{-6}K^{-1}$，显示出与需上砂的釉 α 相吻合，各种瓷砂 α 绝对值在一定程度上取决于黏土、煅烧铝矾土、镁质原料在组成上的含量，以及烧成、冷却工艺制度。各种瓷砂材料的冷热急变性能各异，对于Ⅰ、Ⅱ号瓷砂材料是 190～210K，认为主要是在瓷质显微结构中含有较多莫来石结晶和一定量的堇青石结晶所造成的；对于Ⅲ号瓷砂材料是大于或等于 170K，认为是在瓷质显微结构中含有刚玉晶体所致。上釉上砂的试样瓷弯曲强度提高率可达 20%～40%，表明了瓷 α＞瓷砂 α≥釉 α 匹配原则对提高瓷机械强度的有益作用。

2.3.3　显微结构方面

如图 4.3-6 所示，3 种瓷砂材料显微结构概貌的共同特点是：石英颗粒小，棱角圆钝，颗粒周边有的已析出齿粒状方石英，颗粒周边的熔融层很宽；长石残骸中生长的莫来石针状晶粒回熔现象严重；长石、黏土残骸轮廓模糊，边界蹦解，界限不清楚；堇青石片状晶型多且均匀地分布在玻璃相中；气孔多（面积含量达到 10%）、尺寸较大、形状较圆。以上所述的各物形貌与瓷砂材料玻璃化温度相对较低有关。

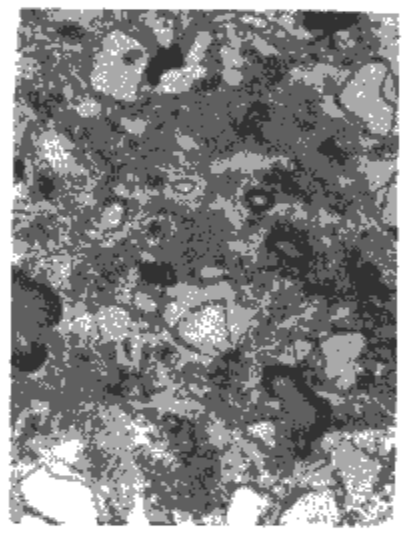


图 4.3-6　瓷砂显微结构

3　瓷材料

电瓷材料是制造电瓷的基础，随着输变电线路电压等级的不断提高，电瓷行业已在普通硅质电瓷材料的基础上根据电瓷产品机械强度的要求，将硅质瓷配方组成中的石英被一定量或全部铝氧原料取代，成为铝质电瓷材料，使电瓷行业可按用户要求提供不同强度性能的电瓷材料，并用它制造相应技术条件的电瓷。

3.1　瓷材料分类及其性能

电瓷材料具有良好的绝缘性能和化学稳定性及较高的热稳定性和机械强度，尤其使它的抗压强度特别高。电瓷是一种脆性材料，冲击强度比较低。瓷材料按化学成分、性能分类，共分为 5 类：C110、C111 系列普通硅质瓷，C112 方石英瓷，C120 铝质瓷，C121 铝质瓷，C130 铝质瓷。表 4.3-30 是各类电瓷材料的基本性能。实际用于产品上的数据比表列数据低，这是因为瓷的机械强度、击穿强度和耐冷热急变性等往往随产品尺寸增大而下降。一般情况下，用性能高的瓷材料制造的产品，其性能也高。

表 4.3-30 各类电瓷材料的基本性能

序号	项目及性能		单位	C110	C111	C112	C120	C121**	C130
				硅质瓷湿法	硅质瓷压制	方石英瓷湿法	铝质瓷	铝质瓷中强度	铝质瓷高强度
1	开口(显)孔隙率最大值 P_a		Vol%	0.0	3	0.0	0.0	0.0	0.0
2	体积密度最小值 ρ_a		mg/m³	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5
3	弯曲强度最小值	未上釉 σ_{ft}	MPa	50	40	80	90	120	140
4		上釉 σ_{fg}	MPa	60	—	100	110	140	160
5	弹性模量最小值 E		GPa	60	—	70	—	80	100
6	平均线膨胀系数	α_{30-100} (30～100℃)	$10^{-6}K^{-1}$	3～6	3～5	6～8	3～6	3～6	4～7
7		α_{30-300} (30～300℃)	$10^{-6}K^{-1}$	3～6	3～6	6～8	3～6	4～7	4～7
8		α_{30-600} (30～600℃)	$10^{-6}K^{-1}$	4～7	4～7	6～8	4～7	5～7	5～7
9	比热容 $C_{p30-100}$ (30～100℃)		J/(kg·K)	750～900	800～900	800～900	750～900	800～900	800～900
10	热导率 λ_{30-100} (30～100℃)		W/(m·K)	1～2.5	1～2.5	1.4～2.5	1.2～2.6	1.5～4.0	1.5～4.0
11	抗热震性最小值 ΔT		K	150	150	150	150	150	150
12	电气强度最小值 E_d		kV/mm	20	—	20	20	20	20
13	耐受电压最小值 U		kV	30	—	30	30	30	30
14	相对介电常数 ε_r (48～62Hz)		—	6～7	—	5～6	6～7	6～7.5	6～7.5
15	介电常数温度系数 $TK\varepsilon$		$10^{-6}K^{-1}$	+600～+500	—	+600～+500	+600～+500	+600～+500	+600～+500
16	损耗因子最大值 (20℃时)	48～62Hz $\tan\delta_{pf}$	10^{-3}	25	—	25	25	25	30
17		1MHz $\tan\delta_{1M}$	10^{-3}	12	—	12	12	12	15
18	体积电阻率直流最小值	30℃ $\rho_{V,30}$	Ω	10^{11}	10^{10}	10^{11}	10^{11}	10^{11}	10^{11}
19		200℃ $\rho_{V,200}$	Ω	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6
20		600℃ $\rho_{V,600}$	Ω	10^2	10^2	10^2	10^2	10^2	10^2
21	相应电阻率的温度最小值	1MΩ T_{p1}	℃	200	200	200	200	200	200
22		0.01MΩ·m $T_{p0.01}$	℃	350	350	350	350	350	350

3.2 瓷、釉的显微结构

3.2.1 瓷的显微结构

电瓷材料按其原料种类及它们的配合比例，在加热过程中液相生成的温度高，液相的黏度也高，因此瓷坯在加热变化和冷却过程中，物理化学反应都是及其缓慢的，只是达到物理—化学平衡的途经上，并依制造工艺，尤其是烧成、冷却工艺制度，使瓷显微结构发育视为趋于平衡，但未完全达到平衡状态。

根据两大类电瓷材料的组成，硅质电瓷显微结构中的物相包括：石英、少量刚玉（指含铝氧原料的硅质瓷）、莫来石，玻璃相和气孔相；铝质电瓷中则是刚玉、少量石英、莫来石，玻璃相和气孔相。瓷的性能取决于各相的含量、分布情况和均匀性。我国日常生产的硅质电瓷和铝质电瓷较具代表性的显微结构概貌如图 4.3-7～图 4.3-10 所示。

3.2.1.1 我国硅质电瓷显微结构概貌及其气孔分布、形态等特征

由图 4.3-7、4.3-8 可见，我国硅质电瓷显微结构概貌及其中的气孔分布、形态等主要特征是：

（1）各物相分布不均匀或很不均匀。

（2）石英颗粒形貌不一致，尺寸大小参差不齐，大颗粒尺寸达 60～110μm 不等，并局部集中，晶粒有裂纹，其周边外围还有弧形或环形裂纹。

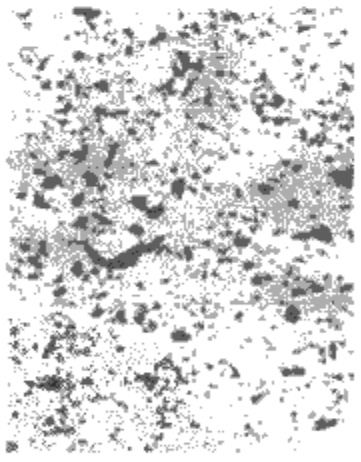


图 4.3-7 国内硅质瓷气孔分布 160×

（3）莫来石含量多，黏土加热分解形成的莫来石晶粒细小，而大的长石颗粒加热生成的玻璃中析出细长或较为粗大莫来石晶体，莫来石晶体的大小和分布不均匀，没有呈现发育良好的毯状和针状晶体成堆均匀分布。

（4）长石颗粒大小不一并偏大，所以长石颗粒融化扩散欠佳，以或阴或明轮廓的假象存在，小颗粒长石融化成似水滩的玻璃，分布不均匀。

（5）气孔形状很不规则，非圆形的多，平均孔径大，波动在 8.5～12.5μm，面积含量达 10%～13%，还有杂质气孔，尺寸可达 50～150μm，分布不均匀。

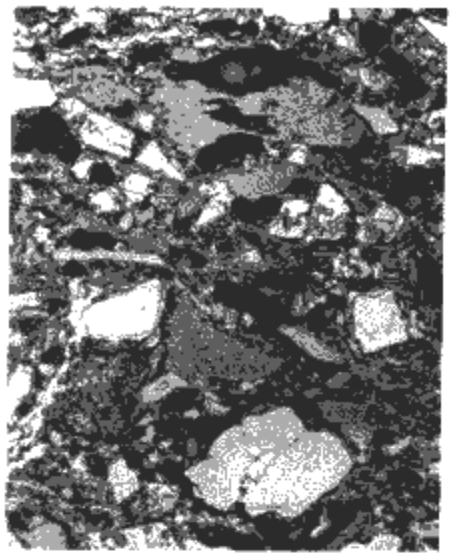


图 4.3-8 国内硅质瓷概貌 320×

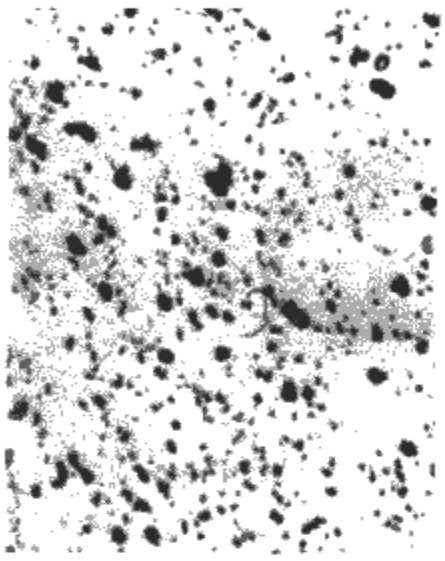


图 4.3-9 国内铝质瓷气孔分布 160×

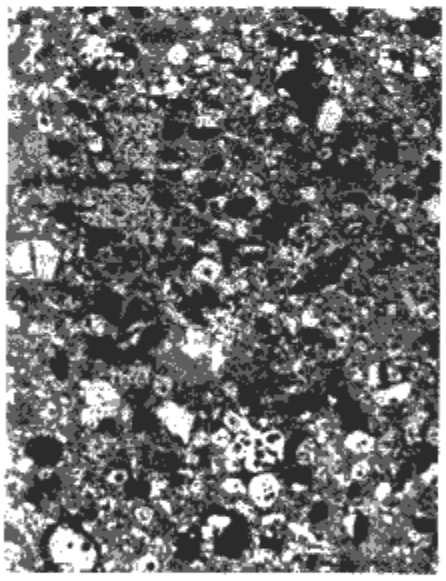


图 4.3-10 国内铝质瓷概貌 320×

如果硅质电瓷组成中含有煅烧铝矾土，则显微结构中还有刚玉结晶，因含量少，它的分布也很不均匀。刚玉晶粒以带空洞的它形晶为主，很多还是反应不完全有如蜂窝状的多孔铝矾土聚集团粒。

3.2.1.2 我国铝质电瓷显微结构概貌及其气孔分布、形态等特征

我国铝质电瓷显微结构概貌及其中的气孔分布、形态等见图 4.3-9、图 4.3-10，其各物相分布的均匀程度比硅质电瓷有了改进，具体表现在：

(1) 石英颗粒含量少，尺寸小，一般以 10μm 以下的多，其次为 10～20μm，有少量大颗粒存在，晶粒裂纹及其周边弧形或环形裂纹少，也不明显。

(2) 莫来石含量多，发育较粗壮，稠密而较均匀地分布在基质之中。

(3) 刚玉单个晶体分散较好，有少量反应不完全的蜂窝状多孔铝矾土聚集团粒存在，但尺寸较小，单体以 10μm 以下的多，个别大的约 20μm，聚集团粒一般在 20μm 以下，个别大的为 30～50μm。

(4) 气孔较圆，平均粒径较小，波动在 7～12μm，面积含量为 10%～14%，仍有杂质气孔，但尺寸较小。

3.2.1.3 国外硅、铝质电瓷显微结构及其气孔分布、形态等特征

国外的硅质电瓷（含方石英晶体）和铝质电瓷显微结构概貌及其中的气孔分布、形态等如图 4.3-11、图 4.3-12 所示。其明显特点是：

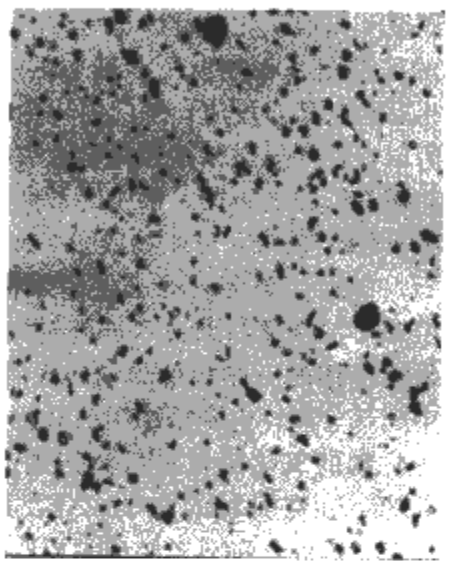


图 4.3-11 国外铝质瓷气孔分布 160×

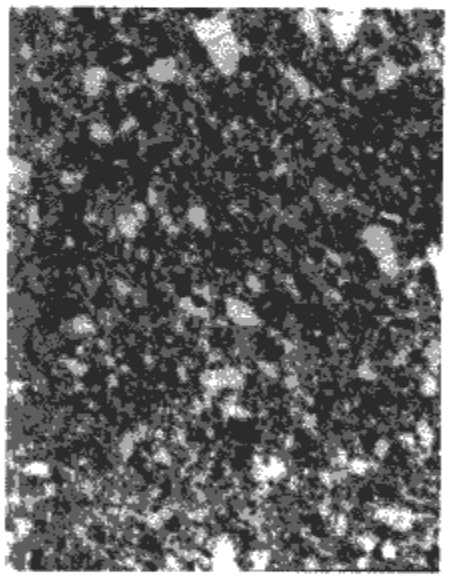


图 4.3-12 国外硅质瓷概貌 320×

(1) 各物相分布很均匀，无局部集中现象；晶体颗粒尺寸差异小，无大颗粒出现；气孔形状圆，平均孔径小，波动在 5～8μm，面积含量约 7%，杂质气孔少量；各物相界面不清晰，说明以发生了一定程度的扩散。

(2) 硅质电瓷的特点是：

1) 石英晶粒周边呈现齿粒花样，是方石英化石英或方石英晶体，这些石英颗粒尺寸都很小，一般在 10μm 以下，少数大于 30μm。

2) 莫来石结晶细小，含量多，在基体中成堆地稠密均匀分布。

3) 玻璃相较好的填充在各晶相之间。

4) 气孔圆小。

(3) 铝质电瓷的特点是：

1) 组成中的石英主要由黏土原料带入，因此颗粒比较细小，以 10μm 以下的多，其次为 10～20μm，个别大石英

颗粒为 38×75μm，大于 15μm 的颗粒当中有裂纹，边上有细小的环行或弧形裂纹。

2）刚玉由工业氧化铝引入，呈条柱状自形晶，晶粒表面光滑，基本无空洞，单个晶体均匀分布于基体中，颗粒长度尺寸以 3μm 以下居多，一般都小于 7μm，无晶粒聚集团粒生成。

3）莫来石、玻璃相、气孔等形貌同硅质电瓷。

3.2.2 釉的显微结构

釉对电瓷起着重要的作用，良好的釉不仅可改善瓷表面质量，而且可提高瓷的机、电、热性能。釉层厚度一般是 0.2～0.3mm，从宏观上来看，这是一层极薄的玻璃态物质，不仅具有各向同性、无固定熔点等均质玻璃的一般性质，而且这些性质随温度和组成变化的规律也与玻璃极其相似。电瓷釉层与玻璃的区别是：在高温下，釉中的一些组分会挥发，坯釉之间相互会扩散、反应；釉的熔化受坯件烧成制度的限制等等，所以，釉层显微结构和化学组成的均匀性都比玻璃差；随釉料矿物组成的不同，釉中经常夹杂一些熔化不彻底的残留石英、黏土中的云母矿物残骸、新生的莫来石、钙长石、尖晶石、辉石、堇青石等晶体以及数量不等的气泡，且其化学组成沿釉层横断面分布亦有不同程度的差异，其分布一般仅靠近瓷体的一侧和釉的最外表层，它们的硅、铝含量比釉层中间部分高；电瓷用釉中的氧化铝含量远多于一般玻璃料，各种釉的氧化铝含量最高达到 16%，头部釉更高达 20%～23%，由各种釉的化学成分及其含量也可以看出釉不同于玻璃。因此，釉显微结构主要取决于釉的组成和烧成、冷却制度。当釉被施与坯体按三角测温锥指示 Sk9～Sk11 全倒的范围烧成时，电瓷釉显微结构中玻璃相含量约占 90%，在玻璃相成分及余下约 10%的晶相变化很大，气孔相也是有同有异。如图 4.3-5 所示，气泡在釉中分布很不均匀，大多数集中于坯釉中间层一侧，气泡大多是由坯体中排除的气体不能逸出而留在釉中。坯釉、釉砂中间层是由于坯釉相互反应而形成的一层坯釉间过渡层，其中间层的反应主要取决于坯釉化学的差别，差别越大反应越剧烈。在坯釉过渡层中，反应带宽为 20～40μm，带中莫来石生长粗壮，并有一层片状和六角形板状排列的堇青石晶体；在釉砂过渡层中，反应带宽为 60～110μm 以上，其中莫来石和片状晶体都较粗大，釉砂中间层与釉接触的周边都已反应生成尺寸不等的片状堇青石结晶。电瓷釉的显微结构物相见表 4.3-31，显微结构概貌见图 4.3-13～图 4.3-16。

表 4.3-31　　电瓷釉的显微结构物相

釉料类别	釉平均厚度（μm）	釉中结晶种类相（按含量递减排列）	气孔面积（%）	备注
白釉	190	残留石英、堇青石、云母残骸	7～10	
棕釉	180	氧化镁、氧化铝、氧化铁尖晶石固溶体、残留石英（有的颗粒周边已析出方石英）	10～15	
天蓝釉	250	锆英石、云母残骸、残留石英、氧化锆、堇青石	9～10	
半导体釉	200	氧化镁、氧化铝、氧化铁尖晶石固溶体，粒状、针状富含铁金红石（$Fe_2O_3 \cdot 3TiO_2$），残留石英（有的颗粒周边已析出方石英）	8～12	
乳白釉	250	锆英石、残留石英、堇青石、云母残骸	7～10	
头部釉	270	片状堇青石，以单晶或聚晶状分布、残留石英	4～6	

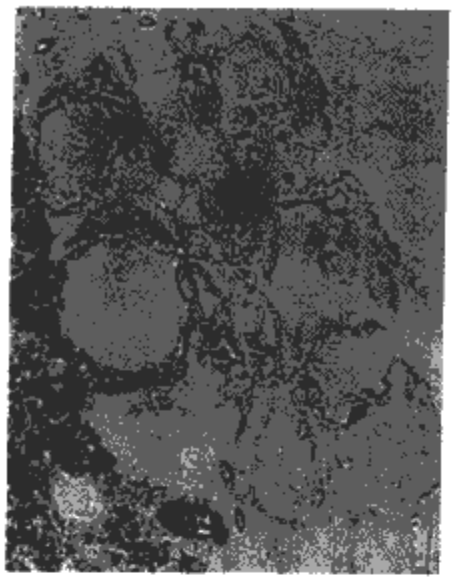


图 4.3-13　白釉显微结构概貌

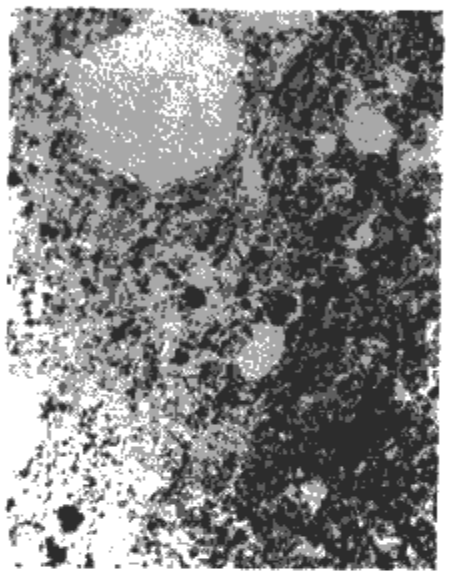


图 4.3-14　棕釉显微结构概貌

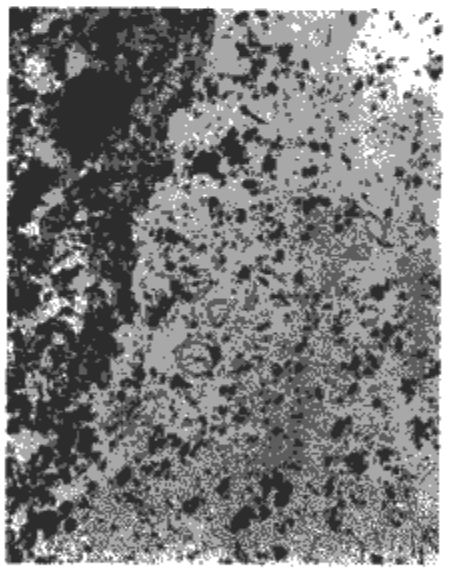


图 4.3-15　天蓝釉显微结构概貌

3.3　提高瓷材料性能的途径

电瓷材料的性能主要体现在三方面：机械性能、电气性能、冷热性能。随着输变电的发展，对电瓷产品的性能，特别是机械强度、电气性能的要求越来越高。要提高瓷材料的水平，需从原料、配方、工艺等多方面同时入手，才能达到较为理想的水平。

3.3.1　提高电瓷原材料性能对瓷材料性能的影响

3.3.1.1　黏土原料对瓷材料性能的影响

电瓷行业使用的黏土可分为软质和硬质黏土两种，软质黏土多为二次沉积黏土，水化率较高，有较高或一定的可塑

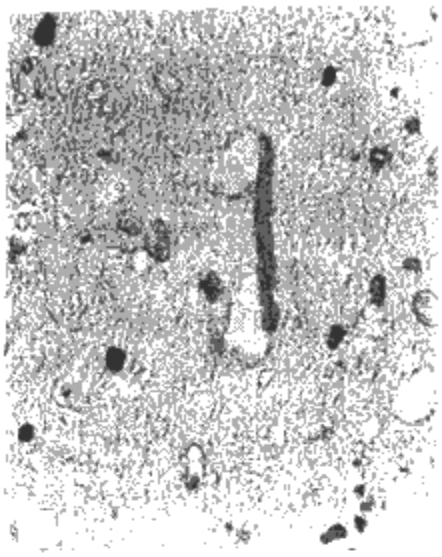


图 4.3-16 头部釉显微结构概貌

性和结合性，但含有较多的游离石英、氧化铁、云母等杂质。硬质粘土水化率低或不水化，可塑性和结合性差，一般品质较纯，但质硬不易加工。为了改善黏土的性能，对软质黏土需采用淘洗工艺进行预加工，以除去大的游离石英、云母等杂质，提高粘土的可塑性、结合性、均匀性、以及 1μm 以下颗粒含量；对硬质黏土应采用机械加工细碎工艺，以提高黏土的细颗粒含量以及均匀性，并使其具有一定的成型性能。试验表明，软质黏土经淘洗后，其高岭土假晶象被破碎，板状结构面大量分层，颗粒变得细小，随着淘洗细度的增加，各项性能有较大的改善，见表 4.3-32。为了改善黏土的悬浮性、可塑性，还可采用阳离子交换的办法来对黏土进行改性，如用碱金属阳离子置换出黏土中的碱土金属阳离子，以达到改善黏土性能的目的。为了得到理想的电瓷用黏土原料，也可将几种具有不同特性的黏土原矿进行合理的配比，通过初碎—配料—湿法搅拌混合—过筛—除铁—榨泥等工艺路线，制造出具有不同性能要求、性能稳定的各种复合型黏土，以满足电瓷发展的需要。

表 4.3-32 安口土淘洗后与原矿的性能对比

名 称	主要化学成分			<1μm的颗粒含量（%）	纯土结合率（MPa）	可塑性指数	总体积收缩率（%）
	Al_2O_3	SiO_2	IL				
原 矿	64.11	21.76	9.40	45.35	6.83	18.68	30.57
80 目淘细料	63.76	22.02	9.51	48.23	7.13	18.89	34.99
160 目淘细料	62.23	23.29	9.78	51.33	7.26	20.10	37.01
250 目淘细料	61.68	24.98	9.98	54.27	7.93	21.92	38.73
250 淘细残杂	94.72	2.89	1.43				

将经过预处理的软硬质黏土引入到电瓷配方后，坯料的工艺性能、瓷质性能较使用原矿有一定的提高。其变化主要体现在：

（1）坯料的可塑性、结合性增加，但同时也出现成型水分提高，收缩增大等不利因素。

（2）坯料的烧成温度降低，玻化温度范围增宽。

（3）随着淘洗后黏土细颗粒含量增加、石英含量减少，瓷材料的线膨胀系数呈下降趋势。

（4）瓷质的显微结构、瓷质均匀性有一定的改善：大的不规则石英颗粒明显减少，最大的石英颗粒尺寸也有所下降；处理后的黏土在瓷质中分散均匀，未出现明显的黏土团；大的不规则气孔的含量明显下降。

（5）由于瓷质均匀性的改善，瓷材料的弯曲强度、冲击强度、电气强度都有一定的提高。

3.3.1.2 煅烧铝矾土对瓷材料性能的影响

煅烧铝矾土是高强度瓷显微结构中作为骨架的主晶相——刚玉的来源，对于普通瓷来说，刚玉晶体也是晶相的一部分。铝矾土中刚玉晶体的完整性、晶粒的大小极其分布对瓷坯性能的影响起着重要的作用。铝矾土中刚玉晶体的完整性除与原矿有关外，还与煅烧温度有直接的关系，试验表明，D—I 型铝矾土的最佳烧成温度为 1550℃，D—K 型铝矾土的最佳烧成温度为 1650℃。铝矾土分级开采和煅烧以及均化成球，回转窑煅烧是提高和稳定铝矾土质量的根本保证。铝矾土的颗粒度对坯料的工艺性能、瓷材料的性能有较大的影响，具体如下：

（1）随着铝矾土颗粒度的减小，导致坯料成型水分、体积收缩、干燥空隙率增高，结合性下降。

（2）随着铝矾土颗粒度的减小，坯料的烧成温度下降，玻化温度范围增宽。

（3）随着铝矾土颗粒度的减小，瓷质均匀性有一定的改善。同时，对铝矾土进行精细加工，还能破坏带孔洞的聚合体和蜂窝状刚玉，使刚玉形态有所改善。试验证明，当刚玉尺寸不断减小，从 15μm→10μm→5μm 时，刚玉晶粒的形态不断得到改善，对瓷强度十分有利。

（4）瓷材料多由多晶材料构成，而多晶材料的断裂往往发生在晶粒的边缘——晶界处，由于晶界比晶粒内部弱，所以晶界属薄弱环节。细晶粒材料沿晶界破坏时，裂纹扩展迂回的路程要长，晶粒越细，此路程越长。另外，烧制的瓷在冷却过程中，由于热膨胀系数的差异，易在晶界处出现应力集中而产生裂纹，当晶界细小时，这种应力会适当减小和分散，使开裂的危险性下降。但铝矾土并非越细越好，晶粒太细对坯料成型性能、瓷材料机械性能都会有不利的影响。试验表明，铝矾土最佳颗粒组成范围为：≥20μm 的颗粒含量占 5%～13%；≥10μm 的颗粒含量占 35%～50%；≥5μm 的颗粒含量占 63%～73%。

3.3.1.3 不同种类矿物熔剂原料对瓷材料性能的影响

熔剂原料是电瓷配方的重要原料之一，它在高温烧成时形成熔融玻璃体，生成瓷材料中的玻璃相，它对瓷质性能有着重要的影响。在我国的电瓷配方中，普遍使用钾长石作为熔剂原料，其主要技术要求是：$K_2O+Na_2O>13\%$，$K_2O/Na_2O>3$。然而，在日本的电瓷配方中，常常使用钠含量较高的长石作为熔剂原料。而在美国，钾霞石作为熔剂原料在电瓷配方中被使用。试验研究表明，三种类型的熔剂原料在电瓷配方的使用中各有特长，若针对不同类型的绝缘子加以合理使用，将会得到更好的效果。三种类型的熔剂原料对瓷材料性能的影响如下：

（1）当配方中引入钠长石或含钠量高的长石后，由于高钠熔剂原料形成的钠玻璃黏度小，易向坯体四周扩散，填充孔隙的能力强，使瓷坯结构均匀，气孔率降低。同时，钠玻璃熔解石英、黏土能力强，一方面改善了玻璃相的成分和性能，另一方面促进了玻璃相中二次莫来石的生成和发育，因此，钠含量高的配方与钾高钠低的配方相比，具有瓷材料弯曲强度高，瓷质均匀性好，吸水率、孔隙率都较低等特点。由于钠离子半径小于钾离子半径，在电场的作用下更易在玻璃介质中产生大量的载流子，因此，在配方中随着钠含量的增加，瓷材料的体积电阻率会逐渐下降。当瓷材料温度升高时，钠含量高的瓷材料体积电阻率比钾高钠低的体积电阻率下降得更为剧烈。针对钠长石或含钠量高的长石对瓷材料性

能影响的特性，对于电气性能要求不很高的棒形支柱绝缘子和瓷套配方，在确保其体积电阻率不低于 $10^{13}\Omega\cdot cm$ 的前提下可适当增加 Na_2O 含量，以改善产品的机械强度。

(2) 钾霞石具有 K_2O 含量非常高、Na_2O 含量非常低、K_2O/Na_2O 远大于 5 的特点，当其引入配方后，在瓷弯曲强度上基本与使用钾长石的配方相当，但在电气性能上——特别是在体积电阻率上要明显好些，可以达到 $10^{14}\Omega\cdot cm$。因此，对于直流悬式绝缘子、除尘器用绝缘子等电性能要求高的产品配方，使用钾霞石作为熔剂原料是非常必要的。

(3) 钾长石的 K_2O、Na_2O 含量介于钾霞石和钠长石或含钠量高的长石之间，因此，在配方中使用后，其材料性能也基本介于两者之间。

综上所述可知，3 种类型的熔剂原料对瓷材料冷热性能的影响差异不大。

3.3.2 配方及显微结构对瓷材料性能的影响

3.3.2.1 瓷质显微结构对性能的影响

瓷质显微结构的物相主要由结晶相、玻璃相及气孔构成。在 C100 系列的 5 种类型的电瓷材料中，不论它们的配比和性能如何变化，它们的结晶相种类总是不变的，皆由莫来石、刚玉、石英等构成。由于材料类型的不同，会使结晶相在瓷的物相中所占的比例有所不同，使莫来石、刚玉、石英在结晶相中所占的比例也不相同。由于瓷质的各物相构成了瓷的结构，因此它对瓷材料性能的影响是非常重要的。

(1) 结晶相对瓷材料性能的影响。

1) 结晶相本身的机械强度越高，提高瓷质机械强度的作用就越大。在电瓷的结晶相中，刚玉、莫来石本身的机械强度大于残留石英和方石英，瓷质结构中含有的刚玉、莫来石结晶越多，瓷质的机械强度越高。

2) 在同一类型的瓷质中，结晶相含量越多，瓷质机械强度越高。

3) 各种结晶的大小形状与瓷质机械强度关系很大。一般认为，瓷质结构中的残留石英大小以 15～30μm 比较合理；而大于 60μm 以上的石英颗粒（颗粒周围易产生环状裂纹），特别是有裂纹的石英颗粒，则会导致瓷质机械强度的下降。对于刚玉、莫来石结晶，一般认为 5～7μm 或 5～9μm 粒状或短柱状的完整结晶比较合理。另外，在瓷质中，结晶相分布越均匀对强度越有利。结晶相对瓷材料的冷热性能、电气性能影响不明显。

(2) 玻璃相对瓷材料性能的影响。玻璃相是瓷材料中除气孔外最弱的物相。瓷质的电气击穿、冷热破坏、机械断裂，往往是绕过结晶相穿过玻璃相而发生的。因此，在保证瓷坯正常烧成的情况下，应尽可能减少玻璃相的含量，以改善瓷质的机电热性能。适当提高玻璃相中的二氧化硅、三氧化二铝的含量，减少氧化钾、氧化钠的含量，改变玻璃相的化学成分，可改善玻璃相本身的弹性模量和强度，从而达到提高瓷质性能的目的。玻璃相中钠含量高会改善瓷材料的机械强度，但会降低瓷材料的体积电阻率。另外，在玻璃相中应消除因长石颗粒融化扩散欠佳而生成的或隐或显的轮廓假相和玻璃滩。

(3) 气孔对瓷材料性能的影响。气孔的存在会降低瓷材料的机、电、热性能，由于在瓷质中要完全消除气孔是不可能的，因此减少气孔的含量和大气孔的数量是非常必要的。瓷质中的气孔最好是分布均匀，细小，呈圆形。

3.3.2.2 新型配方对瓷材料性能的影响

我国的电瓷配方组成基本上以矿物原料为主，随着产品等级要求的不断提高，现有的配方体系已没有更大的拓展空间，化工原料的引入必将成为一种趋势。

(1) 工业氧化铝在配方中的运用。工业氧化铝具有纯度高（Al_2O_3 含量>98%）、杂质少、质量稳定等优点，引入配方后瓷质中的铁钛含量与使用铝矾土的配方相比下降了很多，从而保证了瓷材料性能、特别是电气性能的稳定和提高。另外，对于同等瓷弯曲强度的要求，配方中工业氧化铝的使用量比铝矾土的使用量要小许多，以 C130 瓷为例，使用 30%工业氧化铝与使用 40%～45%铝矾土的机械强度基本相当。为了得到瓷弯曲强度达到 200MPa 超高强度的瓷材料（我国高强度瓷弯曲强度水平基本在 40MPa～160MPa 的范围内），法国在配方中引入了 40%的工业氧化铝。可以看到，工业氧化铝在电瓷配方中的使用将会使我国的瓷材料水平上一个新台阶。

(2) 工业氧化锌在配方中的运用。工业氧化锌作为一种较好的熔剂常在一些釉料配方中被使用。近年来，随着电瓷材料性能要求的不断提高，工业氧化锌已开始逐步进入铝矾土——长石——黏土系列的瓷坯配方中，主要用于高压限流熔断器瓷套的生产。在适当减少长石用量的基础上，在配方中加入 2%～3%的工业氧化锌，可较好地提高瓷坯的烧成性能和瓷材料性能，其优势主要体现在以下几个方面：

1) 降低了瓷坯的烧成温度（降 10～20℃），拓宽了瓷坯的烧成温度范围（约 20℃）。

2) 降低了瓷材料的膨胀系数。

3) 改善了瓷材料的冷热性能。

4) 提高了瓷材料的弯曲强度（提高 20%～30%），使高强度瓷弯曲强度达到了 200MPa 的水平。

(3) 工业碳酸钡在配方中的运用。工业碳酸钡作为一种强熔剂被用于瓷坯配方中，因为其主要的作用是钡离子在电场的作用下迁移非常困难，利用其对钠离子的压抑效应可减少钠离子迁移，从而提高瓷材料的体积电阻率，改善瓷材料的直流特性。如果工业碳酸钡与钾霞石在配方中配合使用，工业碳酸钡使用量在 1.5%～4%的范围内，配方中 Na_2O 含量小于或等于 0.6%，K_2O 与 Na_2O 的比值大于或等于 5.5，其体积电阻率能达到 $10^{15}\Omega\cdot cm$。工业碳酸钡主要用于直流绝缘子和除尘器用绝缘子产品的配方。

4 电瓷的材料、坯釉性能及测试方法

4.1 电瓷材料化学分析

电瓷工业生产中，坯、釉料的化学成分对坯料成型、产品烧成及其性能和外观都有很大的影响，故需精确测定，并加以控制。为保证配方准确，对使用的原料也必须进行化学分析，化学成分合格的原料才能投入生产使用。这就需要一套可靠的、易于掌握的分析方法，以便快速准确地取得分析结果，满足科研和工业生产的需求。本节简要介绍有关电瓷原料及瓷、坯、釉的系统分析流程和分析方法。

4.1.1 系统分析流程及简要说明

(1) 硅酸盐原料及其瓷、坯、釉的分析。分析对象为长石瓷、坯、白釉、黏土、长石、滑石、方解石、白云石、砂岩(SiO_2<95%)等。其分析项目有：灼烧减量、二氧化硅、三氧化二铝、三氧化二铁、二氧化钛、氧化钙、氧化镁、氧化钾和氧化钠。以上分析通常称为硅酸盐全分析，分析结果的总和一般在 99.50%～100.50%的范围内。通常试样在铂坩埚中，以无水碳酸钠作熔剂，高温熔融分解。系统分析流程如图 4.3-17 所示。

(2) 高铝材料及其瓷的分析。分析对象为生、熟矾土、矾土坯、高铝瓷和 95 瓷等。如无特殊要求，其分析项目与硅酸盐全分析项目相同。高铝材料及其瓷中，因含有刚玉和莫来石，属于难熔材料，只能用分解能力强的混合熔剂才能

熔融分解试料，一般常用(1+1)的$Na_2CO_3+Na_2B_4O_7\cdot10H_2O$混合溶剂。该分析对象在铂坩埚中用$Na_2CO_3+Na_2B_4O_7\cdot10H_2O$熔融法分析与硅酸盐试样在铂坩埚中用$Na_2CO_3$熔融法系统分析流程基本相同，只是在盐酸蒸干过程的同时，要加入甲醇或乙醇除硼，且其铝含量都较高，常采用EDTA滴定法。

(3) 棕釉的分析。电瓷生产用的棕釉，其中含有铬、铁、锰等着色氧化物，对产品的性能外观影响大，必须精确测定，加以控制。其分析项目有：1L、SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、TiO_2、MnO_2、Cr_2O_3、CaO、MgO、K_2O、Na_2O。试样采用铂坩埚无水碳酸钠熔融法，其系统分析流程见图4.3-18。

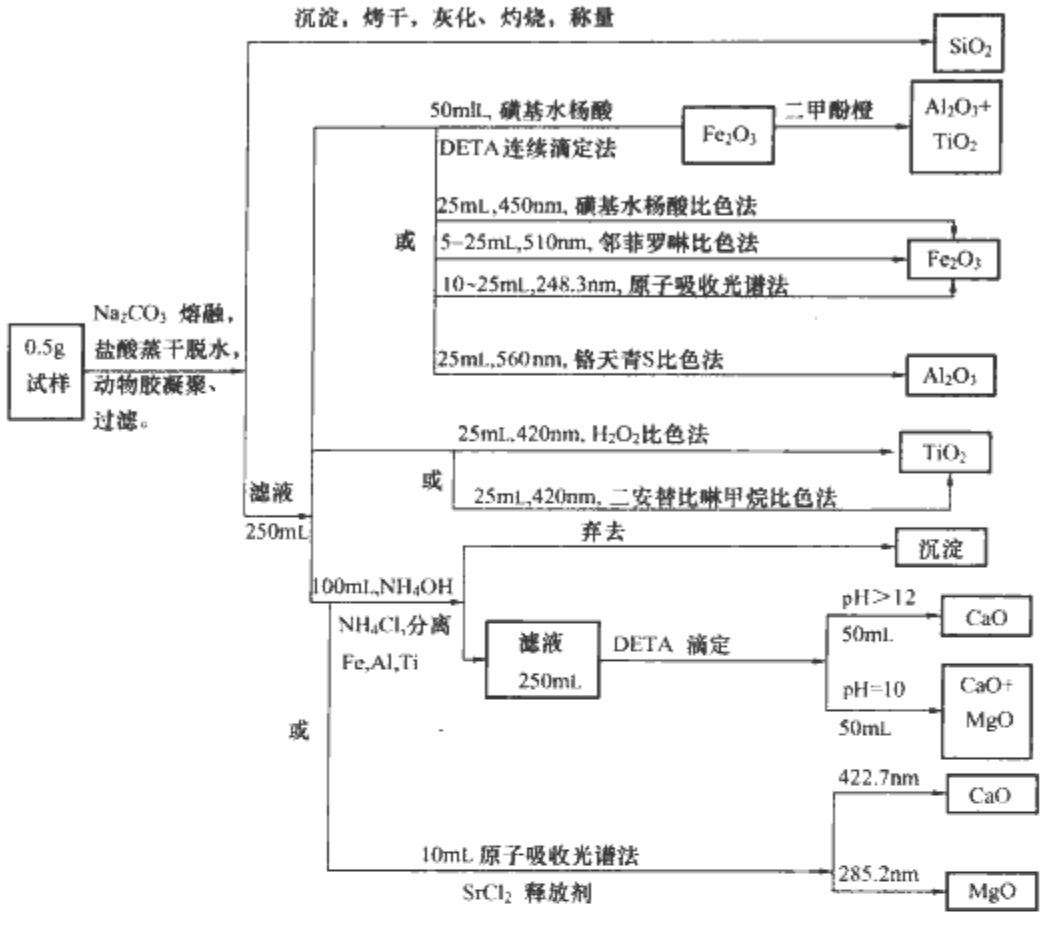


图4.3-17 硅酸盐原料系统分析流程图

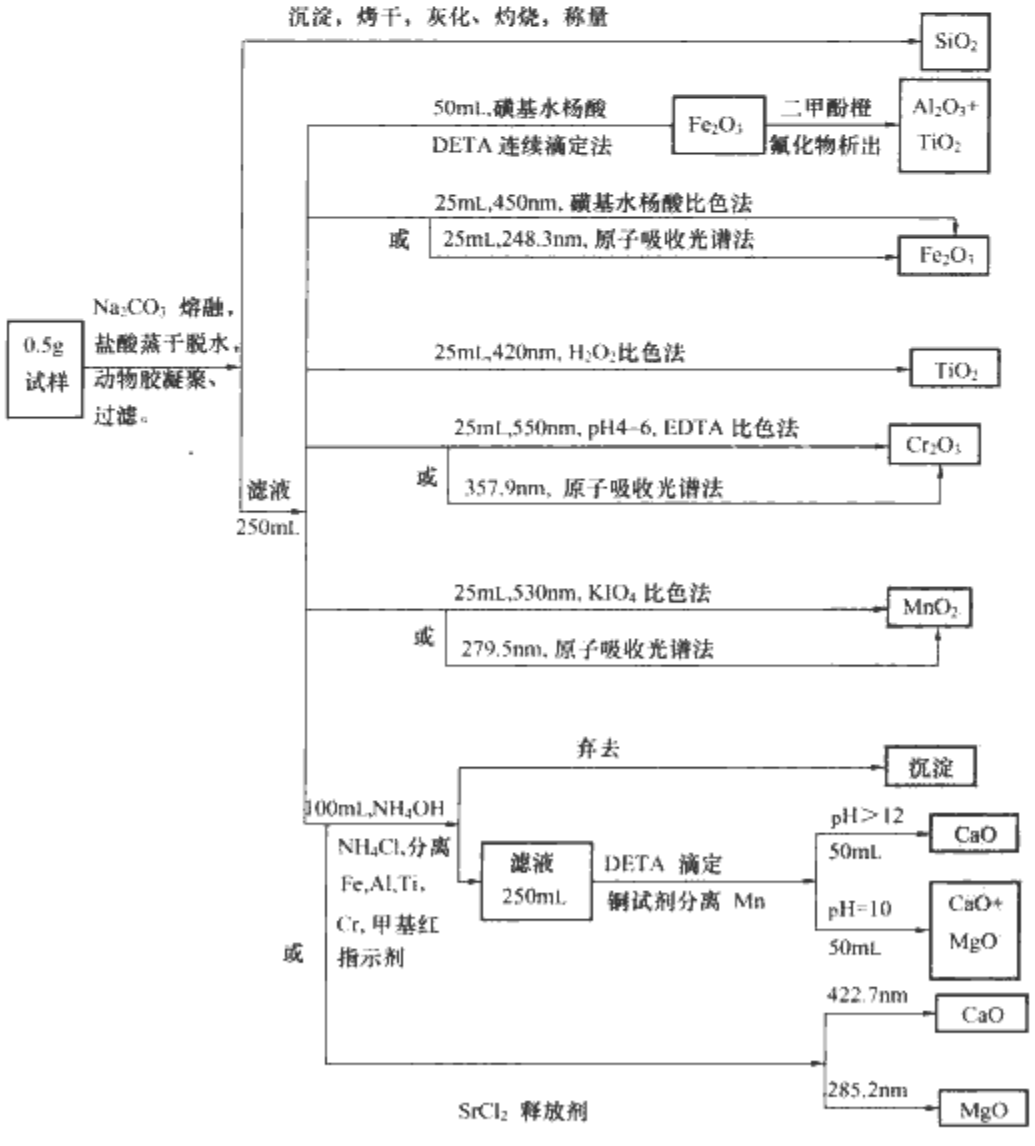


图4.3-18 棕釉的系统分析流程图

（4）石英的分析。石英的主要成分是二氧化硅，常含有微量铁、铝、钛、钙、镁等杂质。二氧化硅及杂质的含量是评定矿石级别及判断是否能作为电瓷原料的重要依据，所以对试样制备和分析工作应严格控制。其分析项目有烧失量、二氧化硅、三氧化二铝、三氧化二铁、二氧化钛、氧化钙、氧化镁、氧化钾、氧化钠。本节所讨论的石英试样中二氧化硅的含量均在 95%以上，为此，常在铂皿中用氢氟酸和硫酸直接处理试样，挥发掉二氧化硅，残渣用焦硫酸钾熔融，制备成试液。其系统分析流程见图 4.3-19。

（5）三氧化二铝的分析。刚玉和三氧化二铝的纯度很高，一般只做 SiO_2、Fe_2O_3、TiO_2、K_2O、Na_2O 及烧失量的测定，有时还要测定 CaO、MgO，根据上述杂质的含量来评定产品的等级，很少进行三氧化二铝含量的直接测定。由于刚玉和工业氧化铝中杂质的含量都很低，因此，在杂质的分析中必须考虑到熔剂的纯度。由于硼砂试剂中含二氧化硅较高，对试样中二氧化硅的分析不利，而且硼砂必须进行多次重结晶才能提纯，操作繁琐。市售的一般硼酸试剂中，二氧化硅的含量较低，故在刚玉和工业氧化铝试样分解过程中采用硼酸、碳酸钠作为熔剂。

硼酸、碳酸钠熔剂与试样在高温熔融的反应过程大致如下：硼酸加热到 100℃时失去一分子水生成偏硼酸（HBO_2）；当试样达到 160℃时，生成四硼酸（$H_2B_4O_7$）；当试样温度达到 600℃时，四硼酸脱水生成硼酐（B_2O_3），与碳酸钠作用生成四硼酸钠，并放出二氧化碳；当到 700～800℃时，四硼酸钠与试样中各组分发生作用。在上述反应过程中，熔剂在铂坩埚中沸腾。于 950℃加热 10～15min 后，反应完全。试样中各组分的阳离子生成硼酸盐，二氧化硅生成可溶性硅酸钠。

根据实验得知：当硼酸：碳酸钠：试样＝0.8：1.7：0.5 时，熔剂的用量最少，熔融情况最好、又便于用水浸取，熔块完全溶解；若硼酸过多，熔融物呈玻璃状，不易被水浸取溶解；当硼酸过少时，试样分解不完全，水浸取熔融物时，试液混浊。其系统分析流程见图 4.3-20。

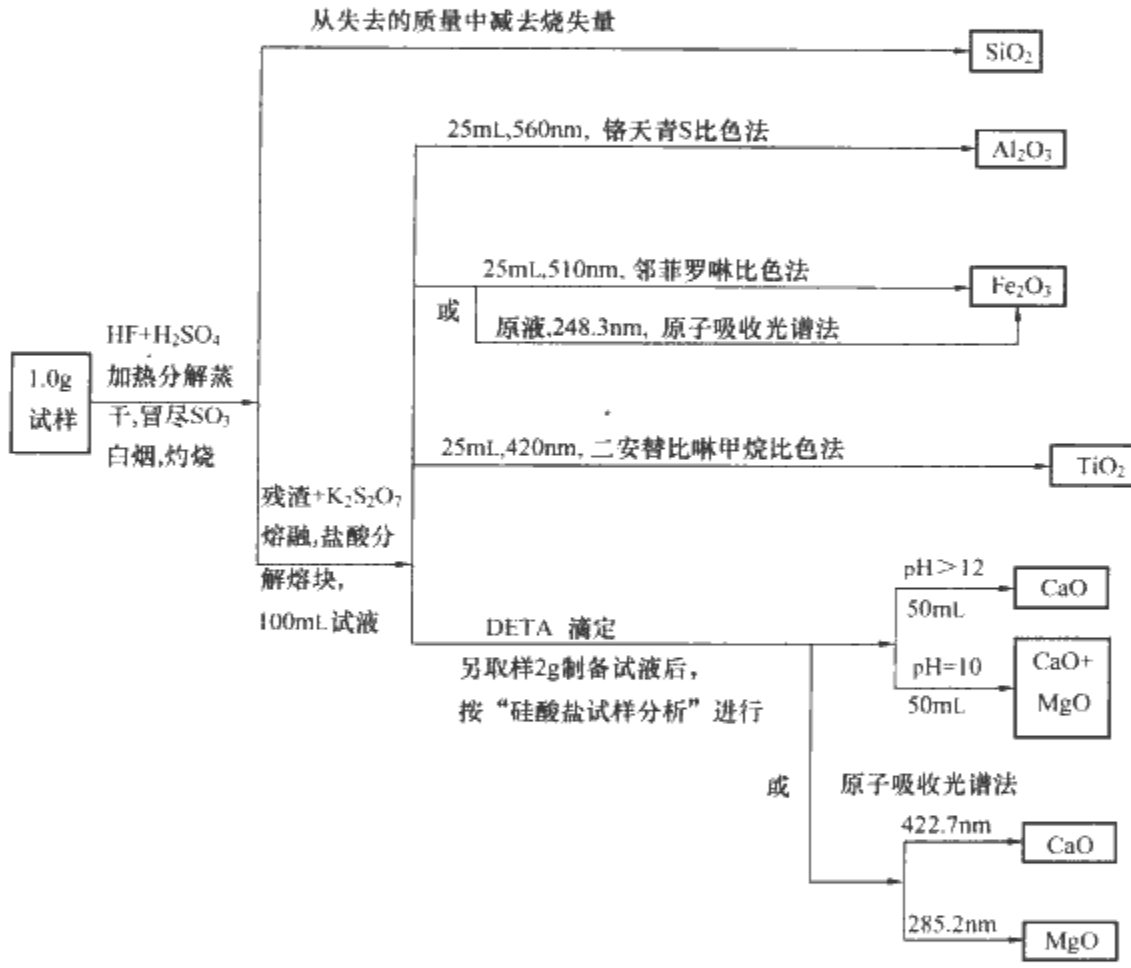


图 4.3-19 石英的系统分析流程图

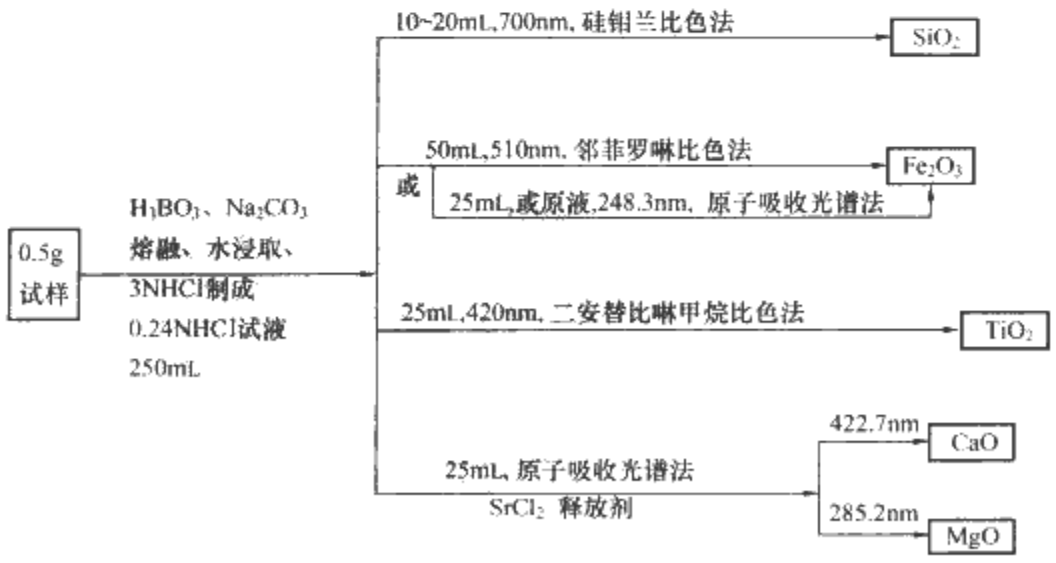


图 4.3-20 三氧化二铝的系统分析流程图

4.1.2 试样中灼烧减量及氧化钾和氧化钠的测定

试样中灼烧减量的测定如图 4.3-21 所示，试样中氧化钾、氧化钠的测定如图 4.3-22 所示。

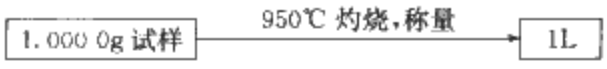


图 4.3-21 试样中灼烧减量的测定

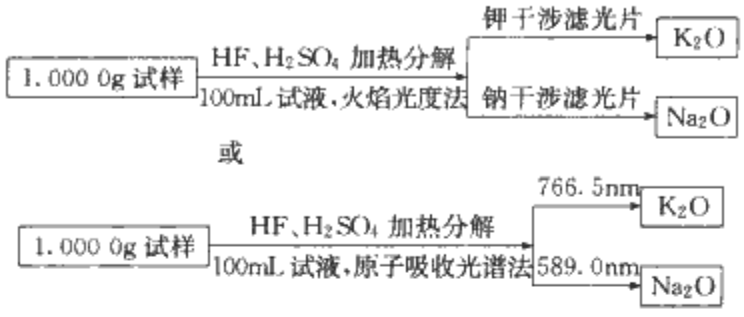


图 4.3-22 试样中氧化钾、氧化钠的测定

4.2 原料性能试验

电瓷用原料是由矿物原料和化工原料组成，各种矿物原料的勘探、开采，选矿加工以及生产用原料进厂检验都必须对原料的物理性能进行试验。在进行新的配方研制时，也必须通过对原料的物理试验掌握原料的性能，为配方提供研究依据。由于原料与坯料和釉料的物理试验有些相同，在介绍中将加以说明。

4.2.1 平均试样的采取

(1) 取样批量。每批原材料（包括坯料釉料用原料、辅助材料、水泥胶合剂用砂及燃料等，以下同）进厂，应按进厂的批次，每批均应取样，进行检验。但若一批数量很大，由于取样的数量有限，进行试验的试样就更少，很难代表整批原材料的全部组成和特性，而且当不合格时，也很难处理，因此，每次取样时，原材料的批量不能过大，超过一定的数量时，即使是同一批进厂的原材料，也应按分开堆放的场地或仓库，或者不同的车厢，分别进行取样检验。当然，取样的批量也不宜过小，否则将增大检验的工作量。若每次进厂的批量很小，每批都取样检验，自然是好的，但工作量大；而有的是连续进厂，不好分批次。像这两种情况，可以将几小批，或一段时间进厂的料，均匀混合成一批，进行一次取样检验，合格后再使用。但不允许一边连续进厂，又未取样检验，就一边连续使用，这样原材料的质量是无法保证的。

为了保证进厂原材料的质量，取样工作应该深入到矿山开采出来的原料，经就地检验合格后再运回工厂，这样不但保证了原材料的质量，杜绝了不合格原材料进厂，而且还可以节省不合格原材料的运输及处理等费用。

取样批量，可根据原材料的种类，历次进厂的数量，生产用量和质量稳定情况等来确定。原材料质量稳定，生产用量和进厂数量大的原材料，取样批量可以大一些，对于质量不稳定的原材料，取样批量一定要小一些，这样不但取样比较准确，而且当原材料检验不合格时，也好处理。一般情况下，坯料用的各种原料，取样批量应不超过 50～150t，釉料用矿物原料应不超过 30～50t。若超过这个数量，虽同是一批，也应分开取样检验才比较合适。对于坯料和釉料用化工原料，每批无论多少，都应取样进行检验。

(2) 取样方法。取样方法正确合理，并且严格按照规定方法进行，是保证所取的试样具有代表性的关键。

1) 料堆取样。存放在料库或堆放在料场的料堆，一般可采用网格法取样。即在整个料堆表面以 1～2m 为间距，交叉划成正方形的网格或长方形的网格，以网格的结点作为取样点，分别在表面和掘下不同的深度，根据取样的总量和取样点的数量，每个取样点取 1～5 kg 样品，而每个取样点取样的数量应基本相等，并应保证在整个料堆的上下、左右、前后，里外各处都能取到一定的样品。

2) 袋中取样。袋装的原材料应根据批量的大小，一般按 1∶20～1∶40 的比例决定取样的袋数，但最少不得少于 5 袋。在取样袋中取样时，必须将口袋打开，在袋深 1/4～1/3处采取样品。每袋取样的数量，由取样的总量和取样的袋数确定，而且每袋取样的数量应相等。

(3) 取样数量。每批原材料的取样数量可根据批量的大小和原材料块度的大小与均匀情况以及试验所需要的数量等确定：为了保证取样的准确性，批量大的应多取一些；块度大，往往不均匀，取样数量也应多一些，块度小而且均匀的原材料可以少取一些；经过加工的粉状原材料，更可以少取一些，但最少不能少于试验所需的数量。一般情况下，每批取样的数量，块状原料应不少于 100kg，批量大的还应多一些，粉状原材料取 20～30kg，化工原料取 2～3kg。

(4) 样品编号、记录及注意事项。试样采取好后，应立即用口袋或其他容器装好封口，明显地标记上原材料名称、编号、取样地点和取样时间等，并放在专门的地方，妥善保管。同时，要将上述内容和原材料进厂的批号、批量、时间、存放的料场、料库，以及外观质量的大概情况、取样人等逐一记录。

4.2.2 试样的加工制备

按照平均试样采取方法取得的试样，一般都超过试验测定所需的数量，因此必须将平均试样进行加工和缩分。经过加工缩分后供试验测定用的试样，必须保持平均试样的组成和特性，才能使试验结果具有意义，这就要求在加工和缩分工作中，严格遵循规定的法则和方法。

最简单的平均试样的加工和缩分，是将原始平均试样全部粉碎细磨到试验所需的粒度，即物理试验一般试样的粒度小于 0.15mm（全部通过网孔尺寸为 0.15mm 的筛），化学分析试样粒度小于 0.06mm（全部通过网孔尺寸 0.06mm 的筛），经仔细混匀之后，再缩分到试验所需要的数量。这种加工和缩分的方法，仅适用于所取的原始平均试样不多的情况，特别是细磨到化学分析试样的粒度，是在试样很少的情况下才这样做。

对于大批量的试样，为了提高效率，可以把破碎、混匀和缩分交替进行。试样量多时缩分、破碎粒度可粗些，试样量少时缩分、破碎的粒度应细些。也就是破碎一次，就缩分一次，再破碎一次，再缩分一次，交替循环进行，使试样越分越少，破碎粒度愈来愈小，直至达到试验所需的数量。

每次缩分之前，如何确定试样破碎的粒度多大比较合适，为简便起见，根据经验，可参考下述情况进行：当试样在 100kg 以上缩分时，应破碎到粒度为 20mm 以下；50kg 左右时粒度应在 10mm 以下；20kg 左右时硬质原料粒度应在 5mm 以下，而黏土原料应在 2mm 以下；10kg 左右时，硬质原料粒度应在 2mm 以下，黏土原料应小于 0.15mm（即全部通过网孔尺寸为 0.15mm 的筛）；5kg 以下的硬质原料试样缩分，也应粉碎到粒度达 0.15mm 以下。

(1) 试样的破碎。为了使平均试样能得到合理的缩分，应先对平均试样进行破碎或粉碎、细磨，然后再进行缩分。

平均试样的破碎或粉碎、细磨，一般在试验室进行。但对于取样数量很大的平均试样，也可以在取样现场进行适当

的敲碎混匀，按照缩分的方法，舍掉一部分，再拿到试验室加工和缩分。

破碎的方法为：对软质黏土原料的试样，可先用木锤打碎，硬质原料则用小型颚式破碎机或滚式破碎机破碎，然后用轮碾机粉碎，盘式研磨机细磨，使试样达到每次缩分所需要的粒度。对于缩分量很少的化学分析试样，可以用相应的研钵研磨到所需的粒度。

必须注意，平均试样在破碎、粉碎、细磨过程中，要防止弄脏、掺杂和散失，粉碎和细磨中带入的金属铁粉，应用磁铁吸除干净。

(2) 试样混匀。混匀也是一个非常重要的步骤。为了得到均匀的试样，使缩分后仍能保持原始平均试样的组成和特性，在缩分前必需仔细混匀，混匀可以在洁净的平板上或水磨石地面上进行，但细粉料或少量试样应在平板上或玻璃板上进行，注意防止弄脏试样。混匀的方法一般有以下几种。

1) 锥堆法。先把试样用铲子拌和一次，再一铲一铲堆成圆锥形堆。每次应将试样铲到锥堆顶上，使之均匀流向四周，直至全部试样堆完。再把圆锥形堆铲平拌和一次，再堆成圆锥形堆。如此重复操作 3～4 次，便可把试样混匀。

2) 环锥法。先将试样堆成圆锥形堆，在锥顶上放一平板，将平板绕圆锥的轴旋转，把圆锥压平。然后按一定方向，用铲子将试样铺成三角截面的圆环形，再将铺成环形的试样从外缘按一定的方向，一铲一铲地堆到环形中央，直至环形的试样铲完，全部试样堆成圆锥形堆。按此重复操作 3～4次，便可把试样混匀。

3) 过筛法。对于少量磨细的试洋，采用过筛法可以很好地混匀，其方法是将试样过筛，筛下用一容器承接试样，反复过筛 2～3 次，便可将试样混合均匀。过筛用的筛子的网孔尺寸，一般为磨细试样中最大粒子尺寸的 2～3 倍，即保证试样每次都能很容易地全部通过筛子。

(3) 试样缩分。试样混匀之后，一般采用四分法进行缩分。四分法缩分的方法是：将混匀的试样堆成圆锥，以薄板把网锥压成圆盘状料堆，并用薄板通过圆盘料堆中心的二条相互垂直的线，将试样分成四等分，将四等分中对角位置的任何两份留下，舍弃其他两份。反复进行，直至缩分到所需的量为止。在四分法缩分中，为了使四等分分得比较准确可靠，可以用相互垂直的十字形的木板，从圆盘形料堆的中心切下，把试样分成四等分。四分法缩分见图 4.3-23。

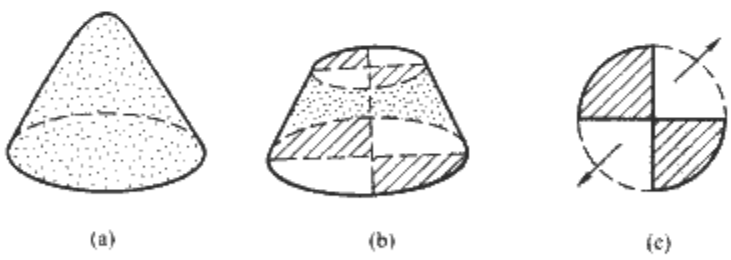


图 4.3-23 四分法缩分试样

(a) 试样堆成圆锥；(b) 用薄板把圆锥压成圆盘状料堆，并分成四等份；(c) 舍弃对角位置的两等份

(4) 试样数量。试验用样品数量经粉碎、混匀、缩分后应满足试验所需的数量。一般进行一次全面的理化性能试验的量是：黏土原料不得少于 10～15kg，长石、石英不得少于 5kg，化工原料不得少于 200g。同时应注意，在最后一次缩分时，本应舍弃的一半应作为副样留下备用。

(5) 黏土试样的制备。黏土原料性能试验中的外貌观察和水化试验的试样应在未经加工缩分的原始平均试样中选取，其他各项物理性能试验的试样，一般要求其粒度小于 0.15mm。因此，经过加工缩分最后得到的试样，应先在 105～100℃温度下干燥后（多水高岭土类黏土干燥温度不高于 50℃），再用磨粉机机械磨粉，全部通过 0.15mm 筛，注意要将试样全部通过该筛，决不能将筛上物弃去。制备好的试样应妥善保管，以备试验用。

4.2.3 外貌观察

外貌观察是选取各种不同外貌的代表性原矿样品，用眼睛或借助低倍放大镜，对原料的原状外观和煅烧后的外观特征进行观察，鉴定原料的外观品质和初步了解其性状，如纯度、杂质类别及含量、软硬程度及色泽、煅烧收缩或熔融状态等。

(1) 原状（未锻烧）外貌观察。凭眼睛或借助放大镜(5～10 倍)，对原料的颜色、光泽、块度（或粒度）、硬度、解理、断面状态以及所含杂质的种类、大小、颜色、数量进行仔细的观察。对于硬质块状原料的断面，可以用榔头敲碎后观察，同时，用手摸原料是否有滑腻感；对于含杂质较多的原料，可以将采取的平均试样混匀后，随意称取 1～5kg (按采取的平均试样的块度大小和数量而定，块度大，数量多的应多取一些)，仔细地将可见杂质挑选出来，称取杂质的量，计算杂质的含量。此外，还可以用盐酸鉴别黏土原料中是否有碳酸盐矿物存在：在不同颜色和结构状态的原料试样上，滴上几滴稀盐酸（浓度1∶1)，看表面是否有气泡产生，如有气泡产生，则表明原料中存在有碳酸盐矿物。

(2) 煅烧后的外貌观察。对选取的外貌观察试样，在原状外貌观察以后，将一半留下，一半送去煅烧。长石和粉状等原料，应放在小匣钵内煅烧；块状原料，可以将一块分成两半，并做好记号，一半留下，一半送去煅烧，以便于煅烧前后的对比观察。试样的煅烧温度一般为 1300℃左右，因此可放在电瓷烧成窑内煅烧。

试样煅烧后，同样可凭眼睛或借助放大镜，仔细地观察试样的颜色、烧结或熔融程度以及收缩等情况、杂质的颜色和状态，有无开裂起泡、膨胀等，并与未煅烧的试样，特别是与留下未煅烧的另一半试样仔细地对比，观察颜色、杂质和形状的变化和收缩的大小等。

在生产中，要检验进厂原料的外观品质，并可以将未煅烧和煅烧后的试样与原定的原料外观品质标准样品进行对比观察分析，以鉴定入厂原料的外观品质是否符合要求。

在进行原料外貌观察时，一定要边观察，边随时详细地做好记录，经核查后，整理提出报告。

4.2.4 黏土水化试验

水化试验是测定黏土原矿在水中自动崩解分散成微细颗粒的程度，测定的方法是将约 $1cm^3$ 大小的黏土块试样放在水中浸泡 24h 后，用网孔尺寸为 0.060～0.063mm 的分析筛筛分，筛下部分占试样总量的百分量被称为水化率；筛上的残渣部分，用眼睛或借助低倍放大镜观察，判定是硬质黏土还是石英砂粒或其他杂质等。

通过水化试验，可以判断黏土的水化难易程度，作为确定黏土加工工艺方法时的参考，也可作为检验黏土进厂的品质指标之一，评定每批黏土原料的水化程度是否一致。

按照黏土水化率的大小，一般可将黏土分为 3 类：水化率大于 70%的称水化黏土；水化率为 70%～40%的称半水化黏土；水化率小于 40%的称难水化黏土。

(1) 仪器和器具。①天平，其称量 500g，分度值 0.1g；②烘箱和干燥器；③分析筛，网孔尺寸为 0.060～0.063mm；④放大镜，5～10 倍；⑤烧杯（500mL)、洗涤瓶、瓷皿（50mL）及盆。

(2) 试样准备。取破碎缩分前的平均试样约 0.5kg，用

木榔头敲至块度为 1cm³ 左右，放入烘箱，在 105～110℃温度下烘干至恒量后，移入干燥器内备用。

（3）试验步骤：

1）准确称取试样 100g 放入洁净的烧杯内，再加蒸馏水高出试样顶面 5cm 左右，静置浸泡 24h。

2）试样经浸泡 24h 后，用玻璃棒搅拌 5min，立即倒入分析筛上过筛。过筛时，将筛半浸在盛有清水的盆内，轻轻摇动筛子，使细颗粒通过筛孔进入盆内水中。更换盆中的水，直至筛在水中摇动，仍为清水为止，即表明再无黏土颗粒通过筛孔。

3）用洗涤瓶喷水冲洗筛面，将筛上的残渣集中到一角，然后全部收集到洁净而已称量的瓷皿内，静置片刻，轻轻倒去上面的清水。将瓷皿连同残渣一起置于烘箱内，在温度 105～110℃下，烘干至恒量。

4）将烘干后的残渣连同瓷皿放在干燥器中冷却至室温后，准确地称取瓷皿和残渣的量。

5）用眼睛或借助放大镜，仔细观察残渣物。

（4）计算。水化率的计算见式（4.3-3）。

$$\text{水化率}(\%)=\frac{m+m_1-m_2}{m} \tag{4.3-3}$$

式中：m 为试样的量，g；m_1 为瓷皿的量，g；m_2 为瓷皿和残渣的量，g。

（5）注意事项：

1）试样静置浸泡水化时，不允许搅拌和加热，并须防止振动。

2）在观察残渣物时，应做好记录，整理后与水化率结果一并写入水化试验报告。

3）试样（残渣）烘干至恒量，是将试样烘干称量后再置于 105～110℃温度下烘 30min，再称量。如此反复进行，直至连续两次称量的数值不变为止。在以下其他测定中要求将试样烘干至恒量的试验，均可采用上述方法。

4.2.5 真密度的测定

真密度是物质的质量与其真实体积（除去开口和闭口孔隙）之比值。

测定真密度的方法中，应用得较为广泛的是比重瓶法，该方法是将物料粉碎至排除全部开口和闭口孔隙，测定烘至恒量的物料试样在空气中的质量和其在比重瓶内排出已知密度的液体（水）的体积后，求出物料的真密度。在了解原料的矿物种类、沉降分析黏土等各种原料和坯釉料的颗粒组成、检验工业氧化铝和铝矾土煅烧后晶形转化的程度、判定电瓷材料或制品的烧成程度及计算其闭口孔隙率，都不可少地要测定它们的真密度。

（1）仪器和器具。①比重瓶，25mL；②天平，分度值 0.000 1g；③烘箱和干燥器；④抽真空装置（图 4.3-24）或加热用水浴锅；⑤分析筛，网孔尺寸分别为 0.15mm 和 0.085～0.090mm 的各一个；⑥玛瑙研钵或瓷研钵；⑦小漏斗、小勺、纱布等。

（2）试样制备。黏土、煅烧铝矾土等原料取粉碎缩分后全部通过网孔尺寸为 0.15mm 分析筛的平均试样；煅烧工业氧化铝粉取平均试样；坯料、釉料和瓷直接取样。对以上原料均称取 50g 左右放在玛瑙研钵中（坯料、釉料和不含砂的软质黏土也可放在瓷研钵中）细磨，使之全部通过网孔尺寸为 0.085～0.090mm 的分析筛，在 105～110℃温度下烘至恒量，放入干燥器内冷却后备用。

（3）试验步骤：

1）取有编号的 25mL 比重瓶 5 只，用洗液和蒸馏水将瓶内外和瓶塞清洗干净。瓶和瓶塞分开全部放入烘箱，在 105～110℃温度下烘干，取出置于干燥器内冷却至室温，塞上瓶塞分别称量。

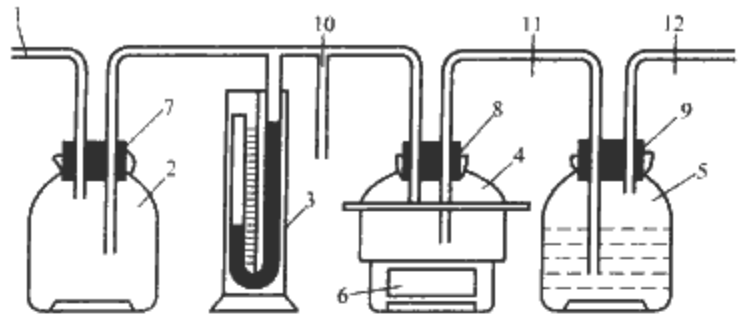


图 4.3-24 抽真空装置

1—接真空泵；2—恒压缓冲瓶；3—水银负压表；4—玻璃容器；5—盛蒸馏水（或火油瓶）；6—盛试样玻璃皿；7、8、9—橡皮塞；10—三通开关；11、12—两通开关

2）取下瓶塞，借助小漏斗，在每个比重瓶中装入 4～6g 制备好的试样，塞上瓶塞后准确称量。

3）再取下瓶塞，把蒸馏水注入密度瓶内，注至瓶容积的 1/3～1/2，将瓶轻轻摇动，使试样全部浸没水中，然后进行排气。排气的方法一般有下面两种，可任选一种：

a. 真空法。将装有试样和蒸馏水的比重瓶（不塞瓶塞）放入抽真空装置（见图 4.3-24）的盛试样的容器内，在相对真空度不小于 97%的条件下，抽真空 2h。然后加入抽过真空或煮沸过的蒸馏水至比重瓶的颈部。

b. 煮沸法。将装有试样和蒸馏水的比重瓶（不塞瓶塞）放在水浴锅（锅中应为蒸馏水）上煮沸 4h。在煮沸过程中水浴锅内的水应保持一定的水位，同时向比重瓶内补充蒸馏水，使试样和水始终保持瓶容积的 1/3～1/2。煮沸后，再加入煮沸过的蒸馏水至比重瓶的颈部，静置 20h。

4）排气后装满试样和蒸馏水的比重瓶，缓缓插入瓶塞，将瓶内空气泡排净。塞紧瓶塞后，用干纱布或滤纸揩干比重瓶和瓶塞表面的水及瓶塞毛细管口的水滴，但毛细管中必须充满水，立即迅速准确地称量。

5）倒净瓶内的水和试样，用水冲洗干净后，注满已煮沸过与试样同温度的蒸馏水，并测量蒸馏水的温度。按试验步骤 4）的同样操作和要求，准确地称取装满蒸馏水的比重瓶的重量。

（4）计算。真密度的计算见式（4.3-4）。

$$\rho_k=\frac{(m_1-m)\rho_t}{m_1-m+m_2-m_3} \tag{4.3-4}$$

式中：ρ_k 为真密度，g/cm³；m 为比重瓶的量，g；m_1 为比重瓶和试样的量，g；m_2 为比重瓶和水的量，g；m_3 为比重瓶和试样及水的量，g；ρ_t 为试验时测量的蒸馏水温度下水的密度，g/cm³，可查表 4.4-33。

（5）注意事项：

1）试样必须全部细磨通过规定的分析筛，以彻底排除试样中的开口和闭口孔隙，并烘至恒量。

2）采用煮沸法排气，应注意比重瓶内气泡的排除和防止试样溅出。随时补充煮沸用水量。水浴锅中的水也应用蒸馏水，以防止使用自来水时，在煮沸过程中比重瓶表面形成一层水垢而影响测定结果。

3）必须将比重瓶、瓶塞表面的水揩干净，不允许用手直接拿比重瓶。

4）每次塞上瓶塞称量，注意 5 个瓶和塞不要错换。

4.2.6 颗粒组成的筛分析

颗粒组成是指物料中各种直径（粒径）的颗粒量占总量的百分含量。筛分析测定颗粒组成是将物料通过网孔尺寸由大到

小的一组（套）分析筛筛分，并测定各筛上的筛余量，计算各种粒径颗粒的百分含量。其表示方法一般用各级粒径之间的颗粒所占百分含量数值或颗粒组成分布曲线来表示。而各种颗粒的粒径，实际上是对应的分析筛的网孔尺寸。

分析筛的筛网是由金属丝编织而成的，网孔为方形孔，网孔尺寸不可能很小。因此，筛分析一般只适用于测定颗粒较粗的物料，如各种硬质原料的粉料，石英砂、瓷砂、等静压成型工艺喷雾造粒的制坯用粉料、碳化硅粉、匣钵熟料粉等。在进行原料性能试验、进厂原料试验及生产中原材料粉碎中，广泛采用筛分析测定颗粒组成。而原料颗粒组成的粗细，直接影响着球磨后的坯料和釉料的颗粒组成和球磨效率。

筛分析有干法和湿法两种。干法一般用于分析颗粒＞0.15mm，且互相不粘而分散的物料；湿法可分析颗粒＞0.040mm，且能被水分散的物料。此外，只用一只分析筛测定物料在该筛上的筛余量占总数的百分含量，也称为筛分析。因此，水化试验中测定水化率、细度测定以及在生产中控制粉碎粒度等，都应用到筛分析。

筛分析方法设备简单，操作方便，也较迅速。因此，凡是测定粉状物料的颗粒组成，都广泛采用筛分析法。但对于针状、纤维状粉料的粒度测定，采用筛分析则不太适宜。

方法一 干法筛分析

（1）设备和器具。①震筛机；②分析筛一套，筛网孔尺寸规格具体由筛分析的目的要求而定；③烘箱、干燥器；④天平，分度值 0.01g；⑤瓷皿、软毛刷。

（2）试样准备。将按取样方法采取的平均试样混匀后，从中称取 500g 左右放入烘箱，在 105～110℃温度下烘至恒量，然后取出放入干燥器内冷却备用。

（3）试验步骤：

1）根据试样筛分析要求，选取清洁干燥的分析筛一组（或一只），将筛按网孔尺寸由大到小叠装好，并装上底盘。

2）准确称取试样 200g（亦可根据所用分析筛数目或多或少），倒入最上面的筛中，然后用顶盖盖好，将整套筛装在震筛机上。

3）开动震筛机，震动 10min，将整套筛取下，将每只分析筛上的筛余物用软毛刷分别扫入洁净并已称量的各个瓷皿中，称量。

4）重新称取试样，按上述步骤，再测定一次。每次筛分析应平行测定 2 次。

（4）计算。

1）每只分析筛上的筛余百分含量的计算见式（4.3-5）。

$$某号筛筛余(\%)=\frac{m_2-m_1}{m}\times 100 \qquad (4.3\text{-}5)$$

式中：m 为试样总量，g；m_1 为瓷皿的量，g；m_2 为某号筛的筛余和瓷皿的量，g。

2）某号筛上累计筛余百分含量为该号筛和网孔尺寸大于该号筛的各号筛的筛余百分含量之总和。

（5）结果表示。设筛分析使用的一组分析筛的筛号为 1、2、3、…、n，其网孔尺寸分别为 α_1、α_2、α_3、…、α_n，且 $\alpha_1>\alpha_2>\alpha_3>\cdots>\alpha_n$，对应于每只筛上筛余的颗粒直径为大于 D_1、$D_1\sim D_2$，$D_2\sim D_3$，…，$D_{n-1}\sim D_n$，通过 n 号筛的为小于或等于 D_n；颗粒的平均直径为 $D_2'=(D_1+D_2)/2$；$D_3'=(D_2+D_3)/2\cdots$；$D_n'=(D_{n-1}+D_n)/2$。每只筛上的筛余百分含量为 A_1、A_2、A_3、…、A_n，通过 n 号筛的颗粒为 A_{n+1}。

1）用各级粒径（直径）的颗粒百分含量数值表示：

颗粒粒径（mm）	筛余量（%）
$>D_1$	A_1
$D_1\sim D_2$	A_2
$D_2\sim D_3$	A_3
⋮	⋮
$D_{n-1}\sim D_n$	A_n
$\leqslant D_n$	A_{n+1}

2）用颗粒组成分布曲线表示。用筛余百分量 A 为纵坐标，对应的平均粒径 D' 为横坐标，可作出试样颗粒组成的分级曲线，如图 4.3-25 所示。若用累积筛余量——每号筛及网孔大于该号筛的各号筛余百分量总和为纵坐标，即 2 号筛的累积筛余百分量为 A_1+A_2；3 号筛的为 $A_1+A_2+A_3$；…；n 号筛的为 $A_1+A_2+A_3+\cdots+A_n$；对应的粒径为横坐标，则可作出试样颗粒组成的累积曲线如图 4.3-26 所示。

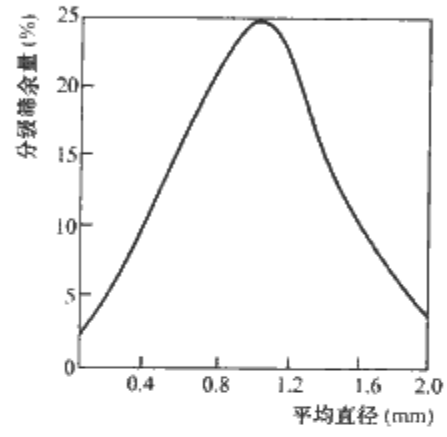


图 4.3-25 筛分析颗粒组成的分级曲线

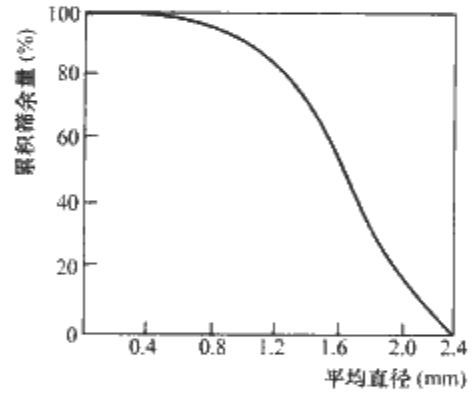


图 4.3-26 筛分析颗粒组成的累计曲线

（6）注意事项：

1）使用的分析筛的筛网应无破损和筛孔不变形及堵塞，并应定期检查和用标准筛校验。

2）震筛时间应严格控制。

3）操作时应小心不使试样损失。

方法二 湿法筛分析

（1）仪器和器具及试剂。①天平，分度值 0.001g 和 0.1g 的各一台；②分析筛一套，具体网孔尺寸规格由筛分析的目的要求而定；③烘箱或红外线灯、电炉、干燥器；④烧杯、瓷皿、脸盆；⑤焦磷酸钠（$Na_4P_2O_7\cdot 10H_2O$ 化学纯）。

（2）试样制备。准确称取 100g 经烘干至恒量的按取样方法得到的平均试样，放入烧杯中，加入 300mL 蒸馏水和 1.5g 焦磷酸钠，搅拌均匀。然后放在电炉上加热煮沸 1～1.5h，使试样全部分散成浆料。在加热过程中，应补加一些水，并适当地加以搅拌，但要注意防止试样溅出。每次应同时制备 2 个试样平行测定。

对筛分析颗粒已充分分散的浆料，如泥浆，则不需要上述制备过程，但应先测定浆料的水分含量，计算相当于

100g干试样的浆料量。按该浆料量直接取浆料，就可作为筛分析的试样。

（3）试验步骤。

1）根据试样筛分析的要求，选取洁净的一组（或一个）分析筛，将筛按网孔尺寸由大到小叠装好，平稳地放在水池内。

2）把制备好的试样倒入最上面的筛内，用手轻轻地振动整组筛，使能通过全组筛的浆料流净。

3）稍稍提起最上面的一个筛，用手轻轻振动，进一步使能通过该筛的浆料全部过到第二个筛内，然后将筛移至盛有清水的脸盆中淘洗，淘洗的水倒入第二个筛内。更换盆中的水，继续淘洗至水清为止，即表明再无试样颗粒通过该筛。注意把所淘洗的水，都倒入到第二个筛内，并用洗涤瓶喷水把上一个筛上的筛余全部冲洗到洁净已称量的瓷皿内。

4）按筛叠装的顺序，逐只重复上述操作，直至全部筛分完毕。

5）把装有各只筛筛余的全部瓷皿放入烘箱，在温度为105～110℃下烘干至恒量。亦可放在红外线灯下烘干至恒量。放入干燥器冷却后，称量。

（4）计算与结果表示。计算公式和结果表示方法，均与干法筛分析相同。

（5）注意事项：

1）试样要完全分散，没有团块。

2）使用的分析筛的筛网应无破损和筛孔不变形及堵塞，并应定期检查和用标准筛校验。

3）淘洗时应注意不使筛内试样溅出，淘洗的水应全部倒入下一个筛内，不应有损失。

4）整个操作均应小心，不使试样损失。

4.2.7 颗粒组成的沉降分析

筛分析只能分析物料颗粒粒径在0.040mm以上的颗粒组成，更微细的物料的颗粒组成，则需用沉降分析方法。黏土原料、坯料和釉料的颗粒都很细，它们的颗粒组成对其可塑性、结合性、干燥性能、收缩率、孔隙率、烧结温度及烧结温度范围，以及烧结体的显微结构和性能的影响都很大；而细磨后的石英（包括天然石英细砂）、煅烧铝矾土和工业氧化铝及各种硬质原料对坯料和釉料的工艺性能、高温性能及瓷质显微结构与性能的影响也很大，有的往往起决定性作用。因此，测定它们的颗粒组成十分重要，而测定的方法均要应用沉降分析。

4.2.7.1 沉降分析的原理

沉降分析物料的颗粒组成是基于同种固体物料不同大小的颗粒，在液体介质中以不同的速度沉降，颗粒大的比颗粒小的沉降得快。根据斯托克斯定律，球形固体颗粒因重力作用在粘滞液体内下落时，若颗粒沉降的速度不很大，则其他的惯性作用可以忽略不计，亦即颗粒与液体之间的相对运动是限于层流沉降，这样就具有与其半径的平方成正比的恒定沉降速度，因而得出下列各数学式：

$$V = \frac{2r^2(\rho_k - \rho_f)g}{9\eta} \tag{4.3-6}$$

当换成颗粒直径表示时，则为

$$V = \frac{D^2(\rho_k - \rho_f)g}{18\eta} \tag{4.3-7}$$

式中：V为颗粒沉降速度，cm/s；r为颗粒半径，cm；D为颗粒直径，cm；ρ_k为颗粒物料的真密度，g/cm^3；ρ_f为液体的密度，g/cm^3；η为液体的粘滞度，Pa·s；g为重力加速度，980cm/s^2。

同时，当物料某一直径的颗粒在某液体介质中沉降时，平均沉降速度是沉降高度与沉降所需的时间之比。可以用公式（4.3-8）表示如下：

$$V = \frac{h}{t} \tag{4.3-8}$$

式中：h为颗粒下沉的高度，cm；t为颗粒下沉h高度所需的时间，s。

由式（4.3-7）和式（4.3-8）可得出

$$t = \frac{18\eta h}{D^2(\rho_k - \rho_f)g} \tag{4.3-9}$$

当某物料的颗粒在某一液体介质中沉降时，ρ_k、ρ_f、η均为固定不变的常数。因此，从式（4.3-7）可知，欲求沉降颗粒的直径，就必须知道颗粒的下沉速度。反之，知道了颗粒的直径，就可以计算出这种颗粒（或大小相同的颗粒团）沉降的速度。若固定沉降高度（h），根据导出的式（4.3-9），即可计算出这种颗粒沉降到h高度底端的时间，利用取样或其他方法，就可得出这种颗粒占物料总量的百分含量。依据该原理，就可得出该物料各个粒径级之间的颗粒含量。

应用沉降分析方法测定的颗粒粒径在0.000 5～0.050mm（0.5～50μm）的颗粒组成范围时，结果较准确。粒径大于0.1mm的粒子，因沉降速度太快，不宜采用沉降分析方法；而粒径小于0.5μm的粒子，沉降时受到布朗运动的干扰，且测定的时间很长，故也不宜采用沉降分析法。必须指出，用沉降分析固体物料的颗粒组成，应具备下述3个前提：

（1）必须是单一物料，而不是密度不同的混合物料。否则，同样大小的颗粒因密度不同，其沉降速度不同，分析结果不能反映实际的颗粒组成状况。由黏土、长石、石英等原料配制的普通电瓷坯料，因其原料的真密度都很接近，均在2.60g/cm左右，故可应用沉降分析方法测定颗粒组成。而加入了熟铝矾土或工业氧化铝的铝质瓷坯料，因煅烧后的铝矾土和工业氧化铝的真密度分别大于3.50g/cm^3和3.90g/cm^3，比坯料中使用的黏土和长石等的真密度大得多，故采用坯料的平均真密度计算各级粒径颗粒的沉降时间，测定分析结果所代表的真实性较差。

（2）上述沉降分析的原理公式仅适用于层流状态。密度大的物料测定颗粒组成则应取密度较大的液体介质，否则，物料的颗粒沉降速度太快，颗粒与液体之间的相对运动呈涡流状态，而不是呈层流状态，从而使测定结果不准确。

（3）上述沉降分析的原理公式是假定颗粒作自由沉降而得出的，因此，悬浮液浓度不能太大，一般应小于5%，以0.5%～1.5%为佳，颗粒要充分分散。同时，容器直径要足够大，以避免粒子沉降受到其他粒子和器壁摩擦阻力的干扰。另外，物料颗粒的形状对沉降速度也有很大的影响，实际物料颗粒多呈不规则的外形，如黏土多呈片状外形，这些不规则形状的颗粒与等体积的球形颗粒的沉降速度是不一样的，而上述公式是由球形颗粒导出的，因此，实际应用以上公式时，其沉降速度应根据颗粒的外形特点乘上相应的“颗粒形状修正系数”。但各种物料的颗粒外形复杂，很难找到一个恰当的“颗粒形状修正系数”，故一般仍采用上述原理公式，不过其分析结果只是近似值。

4.2.7.2 试验悬浮液制备的原则

（1）悬浮介质的选择。制备悬浮液，首先要选择适当的悬浮介质（或称分散介质）。对悬浮介质有下述要求：

1）能很好地浸润颗粒表面，同时又不溶解颗粒，也不与颗粒起化学反应，或者溶解度较小、化学反应极慢，以至可忽略不计。

2）悬浮介质的密度比颗粒的密度要小些，且二者有适当的差值。悬浮液还应有适当的黏度，以使颗粒沉降速度适宜。

3）在试验温度下不挥发或挥发极慢，且无毒性。

应用最广泛的悬浮介质是水。沉降分析黏土，坯料，釉料，以及石英，铝矾土，工业氧化铝，碳化硅等细粉料的颗粒组成均可用水作为悬浮介质。但沉降分析水泥的颗粒组成一般使用煤油。若用水，水泥与水将起水化反应，凝结硬化，无法测定。

(2) 分散剂的选择。除了选择适宜的悬浮介质外，还必须消除悬浮液中的“聚沉”现象，才能满足试验要求。某些物料颗料，当将其放入悬浮介质中时，往往会有若干个颗粒聚集在一起而加速沉降，这种现象称为“聚沉”。显然，聚沉会直接影响试验结果的可靠性，因此，制备完全分散的悬浮液是沉降分析的前提。造成聚沉的因素很复杂，主要与物质颗粒和分散介质的性质有关。例如，液体介质对颗粒表面的浸润性、颗粒表面所带的电荷或所吸附的离子、液体介质的 pH 值等都对聚沉有影响。为了克服聚沉现象，常常在悬浮液中加入分散剂，以帮助颗粒分散，并使润湿后的分散系统稳定。常用的分散剂有下述几类：

1）酸或碱。酸和碱可用来调节悬浮液的 pH 值，以得到最佳的酸碱度。例如 HCl，乳酸，Na_2CO_3，NH_4OH 等。

2）电解质。电解质溶于悬浮液后，其离解的正负离子可被颗粒表面吸附，增厚颗粒表面形成的水化膜，使颗粒之间不易产生聚沉。如焦磷酸钠，六偏磷酸钠，氯化钙等。

3）表面活性物质。此类物质一般为有机物质，其分子由两种基团组成，一种基团可与颗粒表面亲合，另一种基团则与液体介质亲合。因此，它可以在颗粒表面形成一层介质膜，从而使颗粒分开。例如硬脂酸盐、油酸及其盐类、次旱基双萘磺酸钠等。

加入分散剂的量，要能够形成合适的浓度才能克服聚沉。对于上述第①类和第②类分散剂而言，只有在某一浓度范围内才能起分散作用，大于或小于这个浓度反而会使颗粒聚沉。对于第③类分散剂，一般来说，浓度大些则分散得好些。但浓度过大，则会改变悬浮介质的性质——黏度、密度等。

(3) 分散方法。加入分散剂后，为了使悬浮液进一步分散，还须辅以物理分散方法。常用的物理分散方法有煮沸法，超声波振动法等，其目的都是造成振动，使聚集的颗粒散开。

为了使分散剂充分发挥作用，往往将制好的悬浮液存放约 24h 再做试验。在进行沉降分析前，还须进行充分的机械搅拌，主要是为了使已经分散的颗粒在悬浮液中充分分布均匀。为不使颗柱沿径向分级，搅拌方式应避免作圆周运动，而应做垂直运动或颠倒翻动。

4.2.7.3 试验方法

遵循沉降分析物料颗粒组成的原理，实际中应用的试验方法很多，电瓷材料物理试验中应用最广泛的有安德列森沉降瓶法，移液管法，沉降天平法，光透过式法等。

方法一 安德列森沉降瓶法

安德列森沉降瓶由沉降瓶、吸液管、三通转换开关等组成，如图 4.3-27 所示。沉降分析物料的颗粒组成方法原理如下：

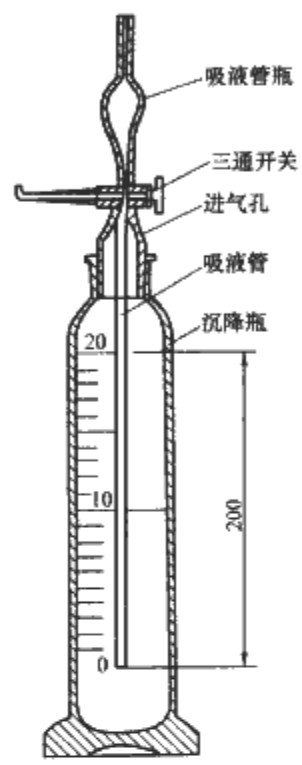


图 4.3-27 安德列森沉降瓶

被测物料的颗粒在悬浮液中沉降的情形见图 4.3-28。沉降开始时（$t=0$），各种大小的颗粒在介质中的分布是完全均匀的。沉降进行了一段时间后（$t=t_1$）。粒径为 D_1 的颗粒（图中“△”表示的）全部降到 AA′面以下，而在此平面以上，只有$<D_1$ 的颗粒；当沉降到时间为 t_2 时，粒径为 D_2 的颗粒（图中“0”表示的）全部降到 AA′面以下；……；沉降到时间为 t_0 时，悬浮液中最小的颗粒—粒径为 D_n 的颗粒（图中“·”表示的）也全部降到 AA′面以下。这样，在不同的时间 t，AA′面处的悬浮液浓度是不同的。$t=0$ 时，该处的浓度即为悬浮液的初始浓度。以后，浓度逐渐变小，到 $t=t_n$ 时，AA′面的浓度为零。显然，相邻两个时刻（例如 t_1 和 t_2）AA′面处的浓度之差，即为悬浮液中相应两个粒径（D_1 和 D_2）间颗粒的含量。在一定的时间，吸出少量 AA′面处的悬浮液，并测出其浓度，再根据不同的浓度值，就可计算出试样各级颗粒的百分含量。

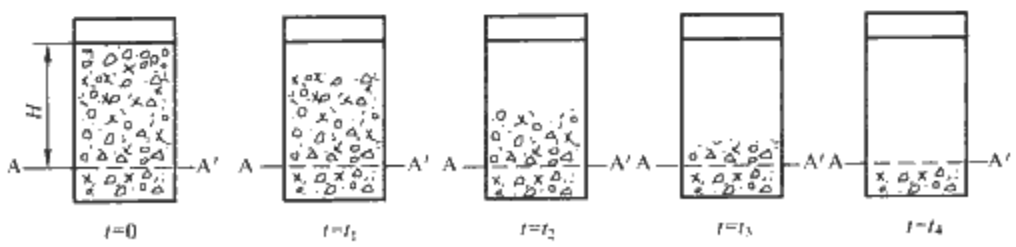


图 4.3-28 悬浮液中颗粒沉降情况示意图

电瓷生产中，沉降分析黏土、石英微粉、煅烧的铝矾土和工业氧化铝微粉以及坯料的颗粒组成，其颗粒一般可分成如下几级：≥63，63～20，20～10，10～5，5～2，2～1，≤1μm；或者≥60～63，≥20，≥10，≥5，≥2，≥1μm。釉料的颗粒组成，一般将颗粒分成如下几级：≥43，43～20，20～10，10～5，5～2，2～1，≤1μm；或者≥60～63，≥20，≥10，≥5，≥2，≥1μm。

沉降分析物料的颗粒组成，先要已知（测定出）物料的真密度。计算沉降分析的实际取样时间，应在试验室内已知悬浮液（蒸馏水）的温度的情况下，依据表4.3-33给出的对应值，将水的实际密度 ρ_f 和黏度 η、物料的真密度 ρ_k 及沉降高度 h 代入式（4.3-9），分别计算出颗粒粒径 D 分别为20μm、10μm、5μm、1μm（应换算成cm）的沉降时间 t，即取样时间。计算时应注意式（4.3-9）中各数值的单位（具体计算可参见本节后的计算实例）。

表4.3-33　　水在不同温度下的密度和黏度

温度（℃）	密度（g/cm³）	黏度（×10⁻³Pa·s）	温度（℃）	密度（g/cm³）	黏度（×10⁻³Pa·s）
4	1.000 00	1.567 4	22	0.997 80	0.957 9
5	0.999 99	1.518 8	23	0.997 56	0.935 8
6	0.999 97	1.472 8	24	0.997 32	0.914 2
7	0.999 93	1.428 4	25	0.997 07	0.893 7
8	0.999 88	1.386 0	26	0.996 81	0.873 7
9	0.999 81	1.346 2	27	0.996 54	0.854 5
10	0.999 73	1.307 7	28	0.996 26	0.836 0
11	0.999 63	1.271 3	29	0.995 97	0.818 0
12	0.999 52	1.236 3	30	0.995 67	0.800 7
13	0.999 40	1.202 8	31	0.995 37	0.784 0
14	0.999 27	1.170 9	32	0.995 05	0.767 9
15	0.999 13	1.140 4	33	0.994 73	0.752 3
16	0.998 97	1.111 1	34	0.994 40	0.737 1
17	0.998 80	1.082 6	35	0.994 06	0.722 5
18	0.998 62	1.055 9	36	0.993 71	0.708 5
19	0.998 42	1.029 9	37	0.993 36	0.694 7
20	0.998 23	1.005 0	38	0.992 99	0.681 4
21	0.998 02	0.981 0	39	0.992 62	0.668 5

（1）仪器和器具及分散剂。①安德列森沉降瓶，见图4.3-27；②天平，分度值0.1mg；③秒表和时钟；④烘箱，电炉；⑤吸取器（可用洗耳球）；⑥标准量筒（200mL，500mL）、烧杯（500mL）、瓷皿或小烧杯（25mL或50mL）、玻璃棒；⑦水银温度计、玻璃杯；⑧焦磷酸钠（或六偏磷酸钠）。

（2）试样悬浮液的制备。

1）试样制备将选取的黏土原料平均试样破碎缩分，粉碎至全部通过网孔尺寸为0.15mm的分析筛。硬质原料微粉、坯料和釉料可以直接取样。然后均在105～110℃温度下烘干至恒量，放入干燥器内备用。

2）分散剂溶液的制备。按试验用悬浮液浓度的0.1%～0.01%（黏土和坯釉料一般可取0.04%），准确地称取焦磷酸钠（或六偏磷酸钠）放入500mL烧杯中，加入约260mL蒸馏水，充分搅拌（约数分钟），使之全部溶解于水。

3）悬浮液的制备按悬浮液浓度为0.5%～1.5%（一般取1.0%），准确地称取制备好的试样，放入装有上述已制备好的分散剂溶液的烧杯中，搅拌数分钟后，将烧杯放在电炉上加热煮沸1小时。加热时，应经常搅拌和补加蒸馏水，以免烧干或溅出试样，待试样完全分散后，冷却并存放24小时后测定。测定时，再加蒸馏水配制成要求的浓度，并充分搅拌均匀。

（3）试验步骤：

1）测量沉降瓶的有效容积。把水倒入沉降瓶，塞上吸液管，使倒入的水刚好充满到沉降瓶20cm刻度处，再将沉降瓶中的水倒入标准量筒中，测量沉降瓶中水的体积，此水的体积即为沉降瓶的有效容积，也就是计算试样悬浮液浓度的体积。

2）按上述方法再将水装满到沉降瓶20cm刻度处，测定每吸出10mL水后每次液面至悬浮液吸出口（吸液管最下端）的高度。这些高度即试样由大到小备级颗粒的沉降高度。

3）准确地称量已编好号并洗净烘至恒量的小烧杯（准确至0.1mg）。

4）将制备好的悬浮液试样倒入沉降瓶，并用蒸馏水洗净烧杯，其水一并倒入沉降瓶。用加蒸馏水的办法，使悬浮液液面在塞上吸液管后，恰好在沉降瓶20cm刻度处。

5）用手将沉降瓶上下摇动2min，使悬浮液中各种粒径的物料颗粒分布均匀。摇动速度以每秒钟上下摇动1次为宜。摇动时，需记住将活塞关闭和用手指将沉降筒的进气孔堵住。停止摇动，将沉降瓶放置在水平的台面上，待悬浮液停止运动，立即开动秒表计时。

6）当按式（4.3-9）计算的试样中最大粒径的颗粒到达自液面沉降到吸液管吸出口平面所需的时间时，打开吸液管上的活塞，用吸取器（或用口吸）慢慢地等速吸取悬浮液10mL，关闭连通沉降瓶的活塞。

7）将吸入的10mL悬浮液放入已称量的小烧杯中。用蒸馏水将粘附在移液管容器壁上的试样颗粒洗入烧杯中。

8）当下一级粒径的颗粒到达自液面沉降至吸出口平面所需的沉降时间时，再按上述操作吸取10mL悬浮液放入小烧杯中。如此重复操作，直至各级粒径的颗粒悬浮液全部吸出，并放入各个小烧杯中为止。

9）把盛有悬浮液的各小烧杯放入烘箱中，在105～110℃温度下烘干至恒量，冷却后称量（准确至0.1mg）。

10）另取制备分析颗粒组成的同一试样，用网孔尺寸为60～63μm的分析筛，以湿法筛分析方法得出筛上的筛余量，即试样中粒径大于60～63μm颗粒的百分含量。

（4）计算方法。

1）粒径大于或等于60～63μm的颗粒百分含量 A（%），按湿法筛分析计算方法计算。

2）沉降分析小于某粒径的颗粒百分含量计算见式(4.3-10)。

$$A_n = \frac{m_n V}{V_1 m} \times 100 \qquad (4.3\text{-}10)$$

式中：A_n 为小于某粒径的颗粒百分含量，%；m_n 为按某粒径计算的时间取出的10mL悬浮液烘干后的试样量（烘干后的总量减去分散剂的量），g；m 为试样的总量，g；V 为沉降瓶的有效容积（即悬浮液的体积），mL；V_1 为每次吸出的悬浮液的体积，10mL。

3）两粒径之间的颗粒百分含量计算见式（4.3-11）。

$$\Delta A_n = A_n - A_{n+1} \qquad (4.3\text{-}11)$$

式中：ΔA_n 为某粒径至下一粒径的颗粒百分含量。

4）必要时可绘制粒径与百分含量（或累积百分含量）曲线。

下面给出一计算实例，其原始数据如下：

试样名称为某普通电瓷坯料。

试样真密度＝2.587g/cm³。

试样取量＝5.83g。

悬浮液浓度＝1%。

沉降瓶有效容积（从底部至20cm刻度处的容积）＝583mL。

分散剂浓度＝0.04%（0.004g/10mL）。

悬浮液温度＝24℃。

水的密度＝0.997 32g/cm³。

水的黏度＝0.9142×10⁻³Pa·s。

各粒径颗粒的沉降时间根据式（4.3-9）计算。

上述公式中的单位已经换算，计算出的各粒径颗粒沉降时间见表 4.3-34。

表 4.3-34 各粒径颗粒的沉降时间

颗粒直径 D（μm）	30	20	10	5	1
沉降高度 h（cm）	20	19.6	19.2	18.8	18.4
沉降时间 t（min）	3.90	8.60	33.80	132.37	3238.70

粒径大于或等于 63μm 的颗粒百分含量，按湿法筛分析测定计算结果为 1.12%。沉降分析各级粒径的颗粒百分含量的计算结果见表 4.3-35。

（5）注意事项。

1）试样颗粒分散的好坏将直接影响测定结果。因此，试样应保持完全分散状态，不允许有凝聚、起团或结块现象。

2）沉降分析物料颗粒组成时，颗粒应为自由沉降。因此，在试验过程中，当开始沉降后，要绝对避免震动。

3）悬浮液的温度不宜过高或过低，一般在 15～25℃范围内比较合适。试验的环境温度将直接影响分散介质的温度。温度不同，分散介质的黏度和密度就不同，颗粒的沉降速度也就不同。因此，在沉降分析的整个时间内，其试验的环境温度应保持恒定或变化不大。

表 4.3-35 试 样 计 算 结 果

取样顺序（n）	小烧杯（g）	小烧杯＋干料（g）	干料（g）	干料－分散剂＝试样（g）	颗粒组成			
					粒径（μm）	含量（%）	粒级（μm）	含量（%）
（筛分析）					<63	98.9	≥63	1.1
1	30.248 6	30.340 2	0.091 6	0.087 6	<30	87.6	63～30	11.3
2	31.574 2	31.654 3	0.080 1	0.076 1	<20	76.1	30～20	11.5
3	29.627 0	29.686 0	0.059 0	0.055 0	<10	55.0	20～10	21.1
4	28.492 8	28.539 6	0.046 8	0.042 8	<5	42.8	10～5	12.2
5	30.317 6	30.353 2	0.035 8	0.031 6	<1	31.6	5～1	11.2
							<1	31.6

4）吸取 10mL 悬浮液的操作是试验的关键。吸取时应保持等速，且不宜过快或过慢，一般以 20s 吸完为宜（以计算的取样时间为基值，在其±10s 内吸完）。

5）每次应刚好吸 10ml，不能重复取样。

6）每次取样后，盛取出样的瓷皿或小烧杯应立即用盖或玻皿盖好，以免灰尘落入，放入烘箱烘干时再拿开。

方法二 移液管法

移液管法沉降分析物料的颗粒组成与安德列森沉降瓶法的方法原理相同，两种方法分析物料颗粒组成的细颗粒部分，其结果都比较准确，两种方法使用的仪器和器具都很简单，其中移液管法更简单些。在沉降高度方面，移液管法采用的沉降高度小一些，因此颗粒沉降时间就短一些，使测定包括小于 1μm 的物料颗粒沉降所需要的时间也就短一些，一般 24h 左右就可以完成全部取样操作；而安德列森沉降瓶法需要 50h 左右才能完成全部取样操作。由于移液管法沉降高度小，沉降时间短，并且用插入吸液管取样，插入和取出时容易搅动悬浮液，破坏颗粒自由沉降状态，且插入的高度不准等，都可能引起误差，使最终结果误差增大，其粗颗粒部分的误差更大些。然而，移液管法采用的试样量较大，取出的试液较多，这样又相对地提高了其准确性。必须指出，用沉降法分析物料的颗粒组成，其误差都比较大，因此，如用上述两种方法同时分析同种物料的颗粒组成，其结果往往不容易一致。

由于移液管法与安德列森沉降瓶法的方法原理相同，因此各级颗粒沉降时间（取样时间）的计算方法也就一样。两者主要的区别仅仅是移液管法的沉降高度一般采用 10cm，式（4.3-8）中的 h 应为 10cm；同时，该方法的试样量比较大，为 15g，悬浮液的浓度为 1.5%。

（1）仪器和器具及分散剂。①量筒（1000mL）、吸液管（20mL）、滴定管架、橡皮管与吸球一套（配置使用），如图 4.3-29 所示；②漏斗（直径 10～15cm）；③搪瓷盘；④末端

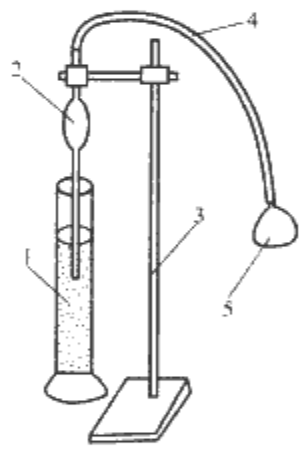


图 4.3-29 移液管法仪器配置示意图

1—量筒；2—吸液管；3—滴定管架；4—橡皮管；5—吸球

装有圆片形橡皮（厚 2mm 左右，直径略小于量筒内径）的玻璃棒；⑤其他仪器和器具及分散剂与安德列森沉降瓶法的相同。

（2）试样悬浮液的制备。试样制备、分散剂溶液的制备和悬浮液的制备均与安德列森沉降瓶法相同。其中悬浮液的浓度一般为 1.5%，悬浮液的总量为 1000mL。因此，应准确地称取 15g 试样制备悬浮液。

（3）试验步骤：

1）准确称量已编好号并洗净烘至恒量的瓷坩埚（准确至 0.1 mg）。

2）将制备好的悬浮液试样过网孔尺寸为 60～63μm 的分析筛，筛下的悬浮液筛在搪瓷盘内，并细心地用少量蒸馏水冲洗筛，借助漏斗将盘中的悬浮液小心地倾倒入量筒内。筛上的残余物再用少量的蒸馏水清洗数次，直到水中见不到颗粒为止。将筛上的残渣冲洗到瓷坩埚内，烘至恒量后称

量。冲洗下来的悬浮液应全部倒入量筒内，并冲洗干净搪瓷盘和漏斗。最后用蒸馏水将量筒中的悬浮液稀释到刚好1000mL。

3）用末端带有圆片形橡皮的玻璃棒伸入盛悬浮液的量筒中，用手上下移动3～5min，使悬浮液均匀地分布在整个量筒中。

4）经充分搅拌后，看量筒中的悬浮液停止运动，立即开动秒表计时。

5）当到达计算的试样中最大粒径颗粒的沉降时间时，将吸液管缓慢而平稳地插入量筒内，插入深度为沉降高度（悬浮液面下10cm），用吸球（或用口吸）缓慢而等速地吸取悬液20mL，再缓慢而平稳地取出吸液管。

6）将吸入的20mL悬浮液放入已称量的瓷坩埚中，吸液管再用蒸馏水清洗一次，将清洗的水也放入瓷坩埚内。

7）当到达下一级粒径颗粒的取样时间时，重复上述操作，直至各级粒径的颗粒悬浮液全部吸出，并放入各个瓷皿中为止。

8）把盛有悬浮液的各瓷坩埚放入烘箱中，在105～110℃温度下烘至恒量，冷却后称量（准确至0.1mg）。

（4）计算方法。计算公式和结果表示与安德列森沉降瓶法相同。其中：试样为15g，悬浮液的体积为1000mL，每次吸出的悬浮液体积为20ml。

（5）注意事项：

1）悬浮液过筛，测定粒径>60～63μm的颗粒百分含量时，操作应特别小心，既要将筛上的残渣冲洗干净，又要使小于60～63μm的颗粒全部过到筛下。当悬浮液全部倒入量筒中时，搪瓷盘和漏斗上的悬浮液一定要清洗干净，不能损失试样，还要控制清洗的蒸馏水不能太多，保证悬浮液总体积不超过1000mL。如果这一操作尚未掌握，悬浮液可以不过筛，直接测定小于60μm以下的颗粒组成，然后按安德列森沉降瓶法另取同一试样，用湿分析法测定大于60～63μm的颗粒。

2）每次用吸管取悬浮液时，插入和取出动作一定要缓慢平稳，不能使量筒中的悬浮液有任何振动。

3）取样插入的深度，应每次刚好离悬浮液液面10cm，取出的悬浮液也刚好20mL。

4）其他注意事项与安德列森沉降瓶法的相同。

方法三 光透过法

光透过法是以沉降分析的原理和固体颗粒的消光现象为基础，当光束通过悬浮的颗粒时消光，随着颗粒不断沉降，透过的光逐渐变强，见图4.3-30。

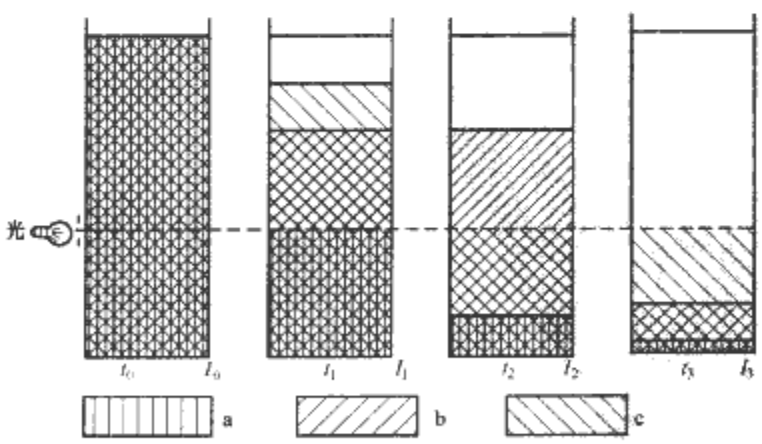


图4.3-30 悬浮液中固体颗粒的沉降和消光示意图

a、b、c—粒子尺寸范围；t_0、t_1、t_2、t_3—经过时间；I_0、I_1、I_2、I_3—透过光的强度

沉降时间：$t_0<t_1<t_2<t_3$

透过光的强度：$I<I_1<I_2<I_3$。

根据上述现象，光透式分析仪可以测定颗粒组成分布。为了加速细颗粒的沉降速度，缩短分析时间，采用了离心机对悬浮液进行离心。

光透过法与其他方法比较，具有悬浮液中无需插入测量器具，所需的试样量极少，悬浮液浓度很小，试验所需的时间也短等优点。这就不仅防止了悬浮液被搅动，也减少了颗粒之间相互影响的可能性，因此适用于自动测定记录。但当颗粒大小接近射光之波长时，几何光学定律受到了破坏。下面以SKC—2000型光透式粒度分布测定仪为例进行简单介绍。

（1）试验方法的基本原理。

1）根据斯托克斯定律。设颗粒直径为x，将式（4.3-9）改写为式（4.3-12）。

$$t=\frac{18\eta h}{x^2(\rho_k-\rho_f)g} \tag{4.3-12}$$

2）光射消光方法原理。如图4.3-30所示，从试管左边射来的光束通过悬浮液时，光受到散射和吸收，光的强度减弱，悬浮液的混浊度借助于光电管很容易精确地测定。光和悬浮液的混浊度之间的关系见式（4.3-13）。

$$\log I=\log I_0-K\int_0^\infty nx^3\,\mathrm{d}x \tag{4.3-13}$$

式中：I为透过光的强度；I_0为透过清液（无粒子）光的强度；K为仪器的常数；x为颗粒的直径；nx为在光通道中粒子的数量。

根据式（4.3-12）得出的粒子在一定高度中沉降的时间和式（4.3-13）得出的消光速率对数，就能获得粒子尺寸的分布状况。

3）悬浮液离心原理。由于沉降速度与颗粒的直径平方成正比，因此，当分析试样中较细的粒子时就需要很长的沉降时间，所以测定的时间也就长。如果将盛有悬浮液的试管利用离心机高速旋转，悬浮液中的颗粒将作高速的圆周运动，并产生一个很大的离心力，使粒子在试管中很快地沉降。如果这个力是重力的60倍，则粒子沉降的速度也是静置状态下自由沉降的60倍。若原来需要10h才能完成的测定，则只要10min就可以完成。

离心机加速沉降的倍数见式（4.3-14）。

$$f=(1.117\,8\times10^{-3})(r_0+h/2)N^2 \tag{4.3-14}$$

式中：f为加速沉降的倍数；r_0为离心机臂的长度，cm；h为沉降的高度，cm；N为转速，r/min。

（2）仪器和器具及分散剂。SKC—2000型光透式粒度分布测定仪组成示意图见图4.3-31，由测量装置、MPS计算机、记录装置三部分组成；配合仪器使用的还有离心机、超声波振动分散器、微型三叶螺旋搅拌器、烧杯（200mL）、玻璃吸管、温度计、纱布等，以及焦磷酸钠或六偏磷酸钠。

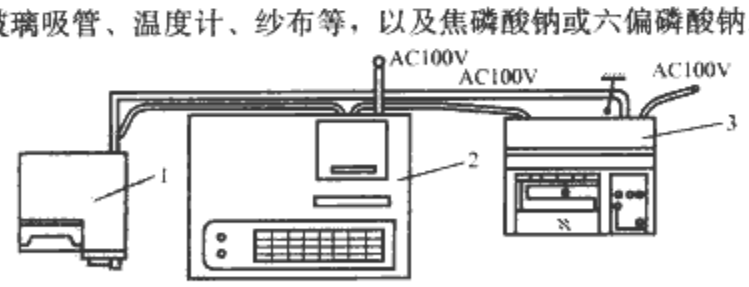


图4.3-31 SKC—2000型光透式粒度分布测定仪装置

1 测量装置；2—MPS计算机；3—记录装置

（3）试样悬浮液的制备。

1）试样的制备与安德列森沉降瓶法相同。

2）分散剂溶液的制备。按分散剂溶液总量200mL，浓

度为 0.04%，准确地称取焦磷酸钠或六偏磷酸钠放入烧杯中，加入 200mL 蒸馏水，充分搅拌，使之全部溶解于水。

3）悬浮液的制备。取制备好的分散剂溶液约 50mL 和少量的试样，放入烧杯中，然后将烧杯置于超声波振动分散器上，振动 3～5min，使试样充分分散均匀。

（4）试验步骤：

1）将试样名称代号、试样的真密度、分散介质（水）的密度和黏度、试验室和分散介质的温度、分散方法、沉降的高度、测定最大至最小各级颗粒直径，以及试验日期、试验人代号、备注等输入计算机。

沉降高度应在 5～80cm 之内，取整数，一般取 20cm 比较合适。最大与最小颗粒直径以 50～0.5μm 比较合适。在 0.5～50μm 之间根据需要可以任意分级。

2）计算机根据输入的数据计算出各级粒子静置自由沉降时间等参数，显示在荧光屏上。自由沉降时间超过 12min 的各级颗粒可以逐级选择一个适当的离心转速输入计算机，计算出离心时间。离心时间以不小于 2min 为宜。

3）取一清洁干燥的试管（仪器专用的），装入分散介质（蒸馏水）至 25mL 刻度处，放入测量装置中测量位置，进行空白校验。

4）用搅拌器将烧杯内的试样悬浮液再次拌搅均匀，倒入洁净干燥的试管中至 25mL 刻度处，把试管盖反盖在口上，用手倒转几次，使之充分均匀分布。用纱布擦干净试管的表面，放入测量装置中的测量位置，校验试样悬浮液的起始浓度，若浓度太大，在试样悬浮液中适当加入制备好的分散剂溶液；若浓度太小，则加入少量试样，重新制备悬浮液。然后按上述操作，直至符合要求为止。

5）将校验好起始浓度的试管从测量装置中取出，重新把试管盖反盖在口上，用手倒转数次，使之充分均匀，再放入测量位置，正式开始测量。

当自由沉降的等级颗粒测量完毕并到达离心测定的颗粒级时，将盛悬浮液的试管放入离心机，按计算的离心机转速和时间离心后，再将试管放回测量位置进行测量。直至各级颗粒全部测量完毕。

（5）试样测定结果的显示和打印。测量完毕，计算机同时计算出：

1）按颗粒分级由小到大等级的累计百分含量。

2）累计分布曲线。

3）按各级颗粒平均直径的百分含量。

4）试样颗粒的平均直径。

5）比表面积等。

上述数据与曲线，可分别显示在计算机的荧光屏上，并可打印在记录纸上。

4.2.8 可塑性能试验

当物料加入一定数量的水调和以后，能捏练成所要求的形状，当外力除去后，仍然保持该形状的能力，称为物料的可塑性。黏土和配入了一定量黏土的坯料均具有可塑性，这是因为黏土加入适量的水后，其颗粒之间具有吸引力和相对滑动的能力。黏土和坯料的可塑性能一般以可塑性指数、可塑性指标及其相应含水率以及可塑度系数等表示。

（1）可塑性指数测定。可塑性指数是表示黏土和坯料呈可塑状态时含水量上限和下限之间的范围，也就是可成形的水分范围，具体用液性限度（液限）含水率和塑性限度（塑限）含水率之差表示。对黏土来说，根据可塑性指数的大小，一般可以把它分为 4 类：指数＞15 为高可塑性黏土；指数在 7～15 之间为中等可塑性黏土；指数在 1～7 之间为低可塑性黏土；指数＜1 为非可塑性黏土。应当指出，这种分法在实际工作中有时只能作为参考。

（2）液性限度的测定。液性限度是黏土或坯料呈可塑状态时的上限含水率。若超过此含水率，粘土即进入半流动状态，承受剪切应力的能力急剧下降。

测定液性限度的方法，一般采用 A·M 华西里耶夫平衡锥法（简称华氏平衡锥法），它是用质量为 76g 圆锥顶角为 30°的锥体自由而缓慢地沉入试样中 10mm 深时，测定其试样的含水率即为液性限度。通过计算，可知黏土和坯料在液性限度状态时，其剪切强度约为 7.8×10^{-3}MPa。

1）仪器和用具。华氏平衡锥如图 4.3-32 所示，它由锥体、手柄、弧形钢丝和平衡球、试样杯、底座等构成。锥体是用不锈钢制成的圆锥体，表面精磨抛光，锥体顶角为 30°，锥体高 25mm，距锥尖 10cm 处刻有环形刻度。手柄实际为旋入锥体的螺钉，顶部至锥尖总高 45mm。弧形钢丝直径为 3mm，两端各连一个质量相等的金属平衡球，球的直径为 19～20mm，钢丝弧顶至球底的垂直距离是 100mm。锥体、手柄、弧形钢丝和平衡球总量为（76±0.2）g。试样杯用金属（铜或不锈钢）制成，内径不小于 40mm，高度不小于 20mm。底座用硬质木料或金属制成，使试样杯及平衡锥能放置平稳。仪器和器具还有天平，分度值 0.01g；烘箱、干燥器；调泥刀、搪瓷盘、瓷皿等。

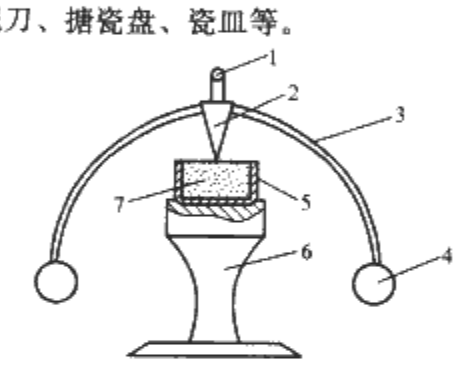


图 4.3-32 华氏平衡锥

1—手柄；2—圆锥体；3—弧形钢丝；4—平衡球；5 试样杯；6—底座；7—试样

2）试样制备。黏土取破碎缩分后，经粉碎并全部通过网孔尺寸为 0.15mm 分析筛的平均试样，坯料取细度合格的干粉。称取 200～300g，放入搪瓷盘中，徐徐加水调和，直至泥料呈浓限状态（凭经验）时，将泥料倒在湿布上揉练均匀，并隔着布用手捏成泥团，用华氏平衡锥初步试一试泥料是否接近液性限度，即锥体是否自由沉入泥料 10mm 深左右。若泥料太稀，沉入深度超过 10mm，可在布上揉练片刻，以吸除水分；若泥料太干，沉入深度小于 10mm，则加入少量的水，继续在湿布上揉练。这样反复操作，直至泥料接近液性限度含水率后，用塑料布将泥料包好，陈腐 24h，使水分进一步均匀。

3）试验步骤：

a. 将制备好的试样再用布包着揉练一次，用华氏平衡锥预测其液性限度。如果接近于锥体下沉的标准深度（10mm），就可用调泥刀把泥料试样装入试样杯中。将试样杯放操作台上轻轻敲动，以排除泥料中的气泡。最后用调泥刀刮去多余的泥料，使其与试样杯口齐平。

b. 用布擦净华氏平衡锥的锥头，并在锥头上均匀地涂上少量凡士林，用手拿住锥体上的手柄，臂端靠住操作台面，把锥体垂直而轻轻地放在试样杯的泥面上，让锥体以自身的重量自由下沉，待 15s 后读出锥头下沉深度。每个试样均按上述方法插 5 次，其中 1 次在试样杯中心，其余 4 次在离杯边不小于 5mm 的四周，每次锥体下沉的深度和读数时

间应该一致。

c. 若锥体下沉的深度每次都刚好为10mm时，即表示试样恰好达到液性限度，若锥体下沉深度小于或大于10mm，则按试样制备方法调整试样含水量，直至恰好达到液性限度为止。

d. 取到达液性限度的试样20g左右，放入已称量的瓷皿中，立即称量。随后即置于烘箱中，在105～110℃温度下烘干至恒量。取出放入干燥器冷却至室温称量，测定试样的含水率。每次均应取2个样平行测定。

4）计算。试样液性限度含水率的计算公式如下：

$$液性限度含水率(\%)=\frac{m_1-m_2}{m_2-m_0}\times 100 \tag{4.3-15}$$

式中：m_0 为瓷皿的量（g）；m_1 为瓷皿和湿试样的量（g）；m_2 为瓷皿和干试样的量（g）。

5）注意事项：

a. 试样加水调和应均匀一致，泥料装入试样杯中应无气孔。

b. 平衡锥应保持干净，润滑。锥体下沉时应保持垂直、轻缓、不受冲击、自由下落。

（3）塑性限度的测定。塑性限度是黏土或坯料呈可塑状态时的下限含水率，若低于此含水率，黏土和坯料将丧失可塑性而呈半固体状态。塑性限度的测定一般采用测定最大分子吸水值。

最大分子吸水值是受黏土颗粒吸引而牢固地保持在颗粒表面的水分膜，表征黏土中不受重力作用的吸附水量。经过试验验证，最大分子吸水值与塑限含水率相当，因此可用最大分子吸水值代替黏土或坯料的塑性限度含水量。最大分子吸水值测定方法简单，平行试验误差小，电瓷行业一般都采用此方法。

1）设备和器具。液压式或机械式材料试验机，最大测量量为50kN或100kN；天平，分度值0.01g；烘箱、干燥器、秒表；金属模环，内圈直径50mm，厚度2mm；定性滤纸，直径60～70mm；丝绸布、表面皿、调泥刀、刮刀等。

2）试样制备。直接取刚好为液性限度含水率的试样测定最大分子吸水值。因此，一般是液性限度试验后，紧接着进行最大分子吸水值的测定。

3）试验步骤：

a. 取滤纸20张叠放整齐，上面放一块丝绸布，再将金属模环放在丝绸布上，用调泥刀将液性限度测定后的试样（水分为液限含水率）填满金属模环，用刮刀刮去多余的试样并刮平，取去模环，使一块直径50mm，厚2mm的试片平放在丝绸布上，再在试片上盖一块丝绸布和20张滤纸。

b. 将滤纸和绸布夹着试片，一并移置材料试验机的上、下平压板之间，开动试验机对试片施加压力。当试验机施加的力达到12 847N（相当于6.57N/mm²）时，保持10min，然后解除压力。

c. 取出试片上、下的滤纸和丝绸布，将试片置于预先称量并编号的表面皿中，立即称量。按上述程序平行测定5个试样。

d. 将全部试样放入烘箱中，在105～110℃温度下烘干至恒量，移入干燥器中冷却至室温，称量。

4）计算。最大分子吸水值的计算与液性限度含水率的计算公式与式（4.3-15）相同。

5）注意事项：

a. 试样应取经过测定液性限度的试样，其水分恰好为液性限度含水率。因此液性限度测定后，应立即进行最大分子吸水值试验。

b. 使用的滤纸和丝绸布应力求一致，试验机施加的压力应保持稳定不变。

c. 用过的滤纸，可选出干净的烘干后再用，丝绸布在洗干净后也可继续使用。

（4）可塑性指数测定

可塑性指数＝液性限度－塑性限度

根据可塑性含义，可塑性指数并不是评定粘土和坯料可塑性能好坏的直接方法，它只表示具有可塑性能时含水率的高低和范围，在评定新的原料和检验原料品质及坯料性能是否发生变化时，具有一定的意义。而可塑性指标一般是用捷米亚禅斯基方法测定，它是表示黏土或坯料在工作水分下，一定直径的泥球试样受压力作用后发生变形至产生起始裂纹时的压力与变形量的乘积。因此，可塑性指标较直观地反映了黏土或坯料的可塑性能。

根据可塑性指标值的大小，可以简单地把黏土分为3类：指标大于3.6为高可塑性黏土；指标为2.5～3.6为中等可塑性黏土；指标小于2.4为低可塑性黏土。

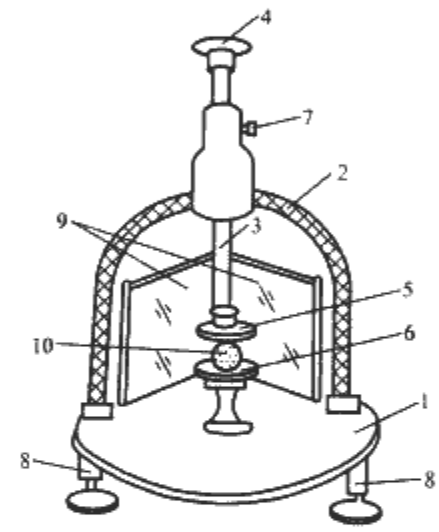


图4.3-33 捷米亚禅斯基可塑性指标仪

1—机座；2—机架；3—金属压杆（带有刻度，能自由上下移动）；4—金属平盘；5、6—金属上下压盘；7—制动螺钉；8—调整水平螺钉；9—观察镜；10—试样

1）仪器和器具。捷米亚禅斯基可塑性指标仪，如图4.3-33所示，它由机座、机架、金属压杆、上下压盘、制动螺丝及观察镜等组成。在金属压杆上面的平盘用来放置盛铅丸的容器，在容器的上方还装置着盛有铅丸的漏斗，漏斗下端装有闸门。打开闸门，漏斗中的铅丸将流入容器内。其他仪器和器具还有取样环，内径和高均为45mm；天平，称量200g、分度值0.01g和称量5000g，分度值1g的各一台；烘箱、干燥器；调泥刀、瓷皿、搪瓷盘等。

2）试样制备。

a. 黏土是称取破碎缩分后，粉碎至全部通过网孔尺寸为0.15mm筛的平均试样1.5～2kg，放入搪瓷盘，徐徐加水拌和成可塑状态（正常操作水分），并充分揉练排除空气，尽量使之达到致密，用塑料布包好陈腐24h。

b. 坯料可直接取经真空练泥机练制出的泥料。

3）试验步骤：

a. 将制备好的试样试验前再揉练一次（经真空练泥后的坯泥不需揉练）。把试样拍打成边长约50mm的立方体泥块，共计10块。用取样环将全部泥块都切成直径×高为

45mm×45mm 的圆柱体。放在玻璃板上，用湿布盖好。

b. 在玻璃扳上，轻缓地将圆柱体试样边角打钝，使其呈圆球雏形，然后置于手心，用双掌将其搓成表面光滑、无折纹的直径为 45mm 左右的圆球，共搓 10 个。把搓成的圆球试样放在玻璃板上，用湿布盖好。

c. 将搓好的 10 个圆球试样逐个放在可塑性指标仪上的金属压盘中央进行测定。用一只手撑住上压板，另一只手旋转制动螺丝，让上压板慢慢放下，刚好接触泥球时，固定制动螺旋，从金属压杆上读取数字（试样直径）。

d. 把盛铅丸的容器放在金属压杆顶端的平盘上，用一只手撑住上压板，另一只手旋开制动螺丝，同时慢慢松开撑上压板的手。抽开盛铅丸的漏斗下面的闸门，让铅丸不断地流入容器内，金属压杆便慢慢下降，对试样施加压力。这时应注意观察试样圆球的变形和是否有微小裂纹出现，试样背面和旁边直接看不见的地方，可以通过镜面观察。当试样表面一旦出现可见的微小裂纹时，立即旋紧制动螺丝和关闭铅丸漏斗的闸门，取下试样。在金属压杆上读数，得到试样变形后的高度，并在分度值为 1g 的天平上称取盛有铅丸的容器重量（重力负荷）。

e. 将取下的试样分别切取 3 个约 20g 左右的样品，置于预先称量并编号的 3 个瓷皿中，立即称量。然后放入烘箱中，在 105～110℃温度下烘干至恒量，移入干燥器中，冷却至室温称量。测定水分的称量均应用分度值为 0.01g 的天平。

4）计算。

a. 试样可塑性指标的计算见式（4.3-16）。

$$\text{可塑性指标} = (d-h)F \tag{4.3-16}$$

式中：d 为试样的直径，mm；h 为试样受压变形后的高度，mm；F 为试样起始开裂时重力负荷（包括铅丸、盛铅丸容器、金属压杆重量之和），N。

b. 可塑性指标的相应含水率按液限含水率的计算公式（4.3-15）计算。

c. 在表示黏土和坯料的可塑性指标时，必须同时注明试样的相应含水率，因为同一粘土或坯料，含水率不同，其指标值也可能会不一样。

5）注意事项：

a. 试样加水调和应均匀，水分应尽可能是正常操作水分，经充分捏练后再搓球。

b. 搓球前必须用湿布润湿手心，每个试样搓球时间应相等，时间不得过长，否则，容易使泥球表面形成一层硬壳，影响试验结果。

c. 搓成的泥球，表面必须光滑，滚圆无折纹，球的直径必须控制在（45±1）mm。

d. 施加铅丸和金属压杆下降，都必须缓慢均匀，不应有冲击力。并注意观察试样受力后的变形，一旦出现裂纹，立即停止加铅丸，同时拧紧制动螺旋。操作应迅速准确。

e. 如果需要详细研究可塑性指标与相应含水率的关系时，可做不同含水率的可塑性指标试验，绘制出指标—含水率曲线。

（5）可塑度系数测定。可塑度系数是黏土或坯料在工作水分下，取一定直径的圆柱体试样，在无侧向支持的条件下，沿轴向以一定速率予以压缩，测出试样在不同压缩状态下的压应力与应变量的关系曲线，并求出可塑度系数。可塑度系数一般以应变量 10%时的压应力与应变量为 50%时的压应力之比表示。

可塑度系数与可塑性指标一样，可以较直接地反映黏土和坯料的可塑性能，与可塑性指标试验结果比较，其误差较小，重复性较好。因为可塑性指标试验结果与搓球的操作和起始裂纹出现的判断关系很大，因而人为误差较大而可塑度系数的测定结果与操作者关系较小。

1）试验方法和基本原理。压缩式可塑度计的结构见图 4.3-34。当电动机启动后，下压板以一定的速度（25mm/min）上升，给试样施加压力，使试样压缩变形。与上压板连接一起的钢梁在试样的压力作用下产生弯曲，固定在上横梁的千分表立即指示出钢梁弯曲的最大挠度。

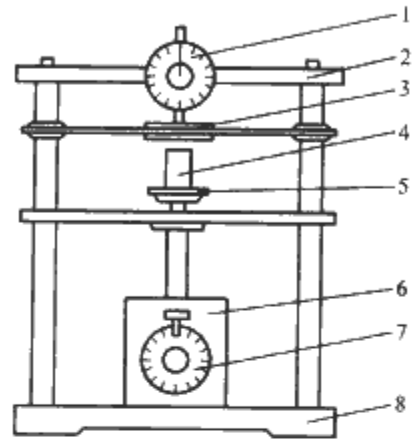


图 4.3-34 压缩式可塑度计

1—千分表；2—上横梁；3—上压板；4—试样；5—下压板；6—保护盒（内装有电动机、齿轮、凸轮）；7—压缩度刻盘；8—底座

设试样压缩前的原始高度为 h_0，横截面积为 A_0，压缩至某一状态时高度为 h，横截面积为 A（实际上泥料经压缩呈桶形，中间粗两头细，A 应为有效截面）。压缩应变量（简称应变）为 ϵ，考虑到试样在压缩过程中体积不变这一事实，可以得到

$$Ah = A_0 h_0 \tag{4.3-17}$$

$$\epsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \tag{4.3-18}$$

由式（4.3-17）和式（4.3-18）可得

$$A = \frac{A_0}{1-\epsilon} \tag{4.3-19}$$

根据梁的弯曲理论，梁弯曲的最大挠度与所受压力成正比。因而测量出钢梁的最大挠度 R（即千分表读数），也就测得试样在不同压缩状态下的压力 F，从而可求出试样所受的压应力 σ。

$$F = BR \tag{4.3-20}$$

式中：B 是与梁的材料及几何尺寸有关的一个常数，称为梁的刚性因子。

而一般用 $\sigma = F/A$ 表示压应力。由式（4.3-19）和式（4.3-20）可得

$$\sigma = \frac{BR(1-\epsilon)}{A_0} \tag{4.3-21}$$

因此，式（4.3-21）把压应力 σ 与梁弯曲的最大挠度直接联系起来。只要读出千分表的读数 R，就可求出不同应变（ϵ）状态下，试样所受的压应力 σ，做出 σ—ϵ 曲线。

仪器采用的试样原始直径为 $d_0 = 2.80$cm，以 $A_0 = \pi d_0^2/4$ 代入式（4.3-21），可计算出不同 ϵ 时的 σ 值，见表 4.3-36。

表 4.3-36 不同 ϵ 时的 σ 值

ϵ	10%	20%	30%	40%	50%	60%
σ	0.146 BR_{10}	0.130 BR_{20}	0.114 BR_{30}	0.097 3 BR_{40}	0.081 2 BR_{50}	0.065 1 BR_{60}

其中，R_{10}、R_{20}、…、R_{60}，是 $\varepsilon=10\%$、20%、…、60%时千分表的读数，在本仪器中单位为0.01mm，而 B 是钢梁弯曲挠度为0.01mm时所受的压力，由仪器出厂时提供或通过实际测量确定的常数。

对一般的检验，为简单计不必求 $\delta-\varepsilon$ 曲线，而直接用可塑度系数表示，即 $\varepsilon=10\%$时的压应力与50%时压应力之比。因此可以得到

$$P=1.8\frac{R_{10}}{R_{50}} \tag{4.3-22}$$

式中：P 为可塑度系数；R_{10} 为压缩应变为10%时千分表的读数（mm）；R_{50} 为压缩应变为50%时千分表的读数（mm）；1.8为是与钢梁的具体尺寸无关的常数。

2）仪器和器具。①压缩式可塑度计，见图4.3-34；②试样成形模具，见图4.3-35，一般用铜材制作，二块合成；③天平，分度值0.01g；④烘箱、干燥器；调泥刀、瓷皿、搪瓷盘等。

3）试样制备。试样制备与可塑性指标试验试样制备相同。

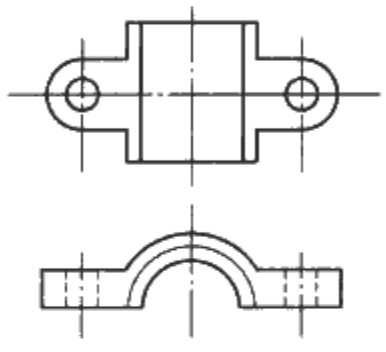


图4.3-35 试样成形模具

4）试验步骤：

a. 将制备好的试样试验前再揉练一次（经真空练泥后的坯泥不需揉练），使之充分均匀。用手工初步搓成直径约28mm的泥段，利用试样成形的模具，手工挤压成形为直径28mm、高度为38.2mm的圆柱体试样，脱模后放在平板上，用湿布盖好，注意脱模后变形的试样不能进行测试。共计成形6个完好的试样。

b. 将放在平板上已成形好的试样小心地移到下压板中央（见图4.3-34），注意不能变形，并与下压板垂直。

c. 接通电动机电源，下压板以一定的速率(25mm/min)上升。试样的顶端与上压板一接触，压缩刻度盘的指示位置正好是0%，随着下压板继续上升，试样变形。当压缩刻度盘指示值（试样应变量 ε）为10%、20%、30%、40%、50%、60%时，同时记录千分表指示的读数 R 值。当压缩刻度指示到60%（或根据试验要求和试验情况，也可较低或更高）时，停止试验，取下试样。将6个试样全部试验完毕。

d. 将取下的试样，分别在3个试样上各切取约20g左右的样品，置于预先称量并编号的3个瓷皿中，立即称量。而后移入烘箱中，在105～110℃温度下烘至恒量，移入干燥器中，冷却至室温称量。

5）计算和作图。

a. 根据试验时仪器刻度指示的值（即试样应变量 ε）和千分表读数 R，以及仪器常数 B 值，按照式（4.3-21）分别计算出不同的应变量 ε、相应的压应力 δ 值再以 ε 值为横坐标，δ 值为纵坐标作图（见图4.3-36）。

b. 按照式（4.3-22）计算出可塑度系数 P。

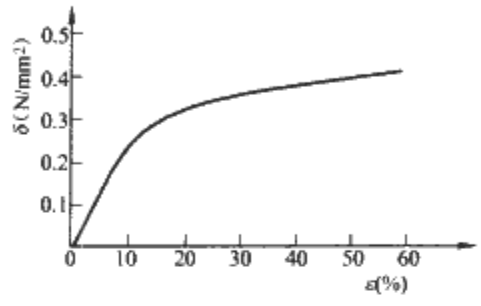


图4.3-36 A高岭土可塑度的压应力与应变曲线

c. 在表示黏土和坯料的可塑度系数和绘制 ε 线时，必须同时注明试样的相应含水率。因为同一黏土或坯料的含水率会不同，其可塑度系数值和相同的应变量时的压应力值也可能会不一样。

d. 相应含水率按液限含水率的计算公式（4.3-15）计算。

e. 计算实例。

试样名称：A高岭土（粉碎淘洗后）

压缩式可塑度计钢梁的刚性因子 B 常数：可通过实际测量，$B=2.80\text{N}/[0.01\text{mm}\times(0.286\text{kgf}/0.01\text{mm})]$。试验测定的 ε 和 R 值及按式（4.3-21）计算出的 σ 见表4.3-37。

根据表4.3-32，绘制出 $\sigma-\varepsilon$ 曲线，见图4.3-36。

由式（4.3-22）求出可塑度系数

$$P=1.8\frac{R_{10}}{R_{50}}=1.8\times5.8\div16.5=0.63$$

试样的含水率测定结果为28.4%。

（6）注意事项：

1）手工挤压成形试样尽可能致密一致，脱模后不得变形和有裂纹。

2）试验时，当压缩刻度盘指示到达每个规定应变值时，必须同步准确地读取相应千分表的指示值。

4.2.9 黏土结合力试验

黏土与瘠性物料混合，加水后能结合形成良好的泥团，

表4.3-37 试样的应变量、千分表读数及计算出的压应力值

ε值（%）	R值（0.01mm）						R_{av}	σ (N/mm²)
	试样1	试样2	试样3	试样4	试样5	试样6		
10	5.5	5.8	5.7	6.2	5.5	6.1	5.8	0.023 7
20	8.7	9.0	8.5	8.9	8.6	9.1	8.8	0.032 0
30	10.5	11.0	10.5	10.9	10.5	11.5	10.8	0.034 5
40	13.0	13.5	12.9	13.1	13.1	14.1	13.3	0.036 2
50	16.5	16.5	15.8	16.5	16.3	17.5	16.5	0.037 5
60	22.5	22.5	22.1	22.9	22.5	23.8	22.7	0.041 4

且干燥后保持其原来所给予的形状，并具有一定的强度，这一性能称为黏土的结合力，或者称为结合性能。

黏土的结合性能是由于黏土颗粒具有结合力（内聚力）而能互相牢固地结合在一起所形成的。结合力，就是把黏土颗粒分开所需要的力，它与黏土的成因、产状、矿物组成、杂质及粒度等有关。通常，随着结合力增大，其可塑性能也变好，反之亦然，二者之间存在着一定的内在联系。因此，在一般的情况下，可根据黏土的结合力来判断其可塑性能，或者根据可塑性能估计结合力。电瓷生产中，有时测定黏土的结合力比测定黏土的可塑性更具有意义。

试验了解黏土的结合力，不仅可以评定黏土的工艺性能，而且可以估计黏土引入坯料配方后，对坯料成形和干燥性能的影响。

黏土的结合力试验，是在黏土中掺入不同比例的标准砂，加水形成泥团，并做成一定规格的试样，测定试样干燥后的弯曲强度。因此，黏土的结合力是用黏土加入不同比例的标准砂和试样干燥后的弯曲强度来表示。一般黏土与砂之比为 100/0、80/20、60/40、40/60、20/80，或者只试验 50/50 一种配比。

（1）设备和器具。DKZ—500 型抗折试验机或 DKZ—500A型数控抗折试验机；游标卡尺，最小分度值 0.05mm；金属试样成形模，内腔宽×高×长为 25m×12.5mm×150mm 或者 20mm×20mm×150mm；烘箱、干燥器；搪瓷盘、刮刀、木锤、钢丝弓等。

（2）试样制备。

1）称量破碎缩分后，粉碎至全部通过网孔尺寸为 0.15mm 筛的平均试样 6～7kg，烘干。

2）一般采用石英砂或河砂作为标准砂，其颗粒大小为 0.25～0.15mm 的占 70%，0.15～0.090mm 的占 30%。可按下述方法制备：

先把砂过网孔尺寸为 0.25mm 筛，将筛网上的砂弃去，筛下的砂再过网孔尺寸为 0.15mm 筛，筛上砂的颗粒大小即为 0.25～0.15mm。再将筛下的砂过网孔尺寸为 0.09mm 筛，筛上砂的颗粒大小即为 0.15～0.090mm。再按规定比例称量配合，拌匀后即为标准砂。

3）将制备好的黏土试样和标准砂，按试验规定的比例（黏土/砂为 100/0、80/20、60/40、40/60、20/80）分别称取黏土和标准砂的量，每种比例称取二者的总量为 2kg，分别放入搪瓷盘，拌合、混匀，加入适量水，用手捏练，制成泥团，标明记号，用塑料布包好，陈腐 24 小时（如果黏土的结合性能不好，后面几个比例因黏土太少无法成形时，可以不做试验，或者为了简化试验，也可只做 50/50 或 100/0 一种比例）。

4）将已陈腐过的试样泥团，充分捏练一次，用手压成 8～10mm 的薄片，观察其成形能力，并用下列符号表示成形性能的好坏。

成形性能良好：＋＋＋

成形性能一般：＋＋

成形性能不好：＋

不能成形的：－

5）把试样捏练成一团，用钢丝弓切成长条状，放入金属的试样成形模内，上面铺一块布，用木锤捣打结实，正反两面都打，然后用刮刀刮平，再拿木条（宽度和长度略小于成形模内腔的宽度与长度）将模中试条顶出，放在垫有纸的玻璃板上阴干，每种试样至少做 10 根试条，并定时翻动，防止阴干时变形。

6）试条阴干至稍发白后，移入烘箱中，先在较低的温度下烘一段时间，然后逐渐升温至 105～110℃烘至恒量，取出放入干燥器内冷却至室温。在整个阴干和干燥过程中应使试样不开裂不变形。选取 1 根符合要求的试样供试验。

（3）试验步骤：

1）选择试验机的测量量程为 1000N 进行试验，连接好上下夹具，接通电源，按试验操作程序调整游动砝码，使游标零线对准读数尺的零线。

2）将试样放入夹具内，松开大小平衡砣上螺钉，调整大小平衡砣，使大杠杆处于水平位置，然后将平衡砣上螺钉锁紧，固定。

3）使夹具内的试样对齐对准板，即试样与上下夹板的支架棍和夹负荷辊垂直。转动夹具上的手轮，使下夹具上的加荷辊与试样接触，并使大杠杆稍稍有点扬角，其原则是试样折断时大杠杆尽可能处于水平位置。

4）启动按钮，使电动机转动，带动丝杆推动游丝砝码向左移动，并对试样加负荷，直至试样弯曲折断。此时大杠杆下落，行程开关撞板压下行程开关，切断电机电源，待电机停止转动后立即从游动砝码左侧游标上读出折断负荷值。

5）按下游动砝码上按钮，推动游动砝码左移回零，再把下一根试样放入夹具内，重复步骤（3）和步骤（4），直至 10 根试样全部弯曲折断，测量每根试样折断处的高度和宽度。

（4）计算和结果表示：

1）试样干燥后弯曲强度的计算见下式

$$R_a = \frac{3FL}{2bh^2} \tag{4.3-23}$$

式中：R_a 为试样弯曲强度，N/mm^2；F 为试样折断时负荷，N；L 为试样两支点间距离，100mm；b 为试样折断面宽度，mm；h 为试样折断面高度，mm。

2）试验结果的表示应包括黏土和砂的比例、试样的成形性能，以及弯曲强度。

（5）注意事项：

1）制作试条的泥团必须经充分捏练，试条应致密无气孔，表面光滑平整，进行弯曲试验的试条不得变形和有裂纹。

2）试条烘干后，从烘箱取出时，必须直接放入干燥器中，冷却后立即测定弯曲强度，试样应从干燥器中取出一根试验一根，以防止试条吸潮而影响强度。

3）测定弯曲强度时，调整试验机的大杠杆扬角切勿过大，尽量做到试样折断时大杠杆处于水平位置，若过高会引起误差。试条的折断位置应在中央，其余部位折断，均属不正常现象，不能参与结果计算。

4）试条成形时，也可将黏土试样与标准砂拌匀后，加水拌和成半干湿状态的粉料，用半干压法成形，但每根试条的压力应一样。由于试条成形方法不同，其弯曲强度可能会有所差异，在试验结果中应加以说明。

5）结合力小的黏土，试样的弯曲破坏负荷小，若采用 DKZ—500 型抗折试验机，往往会电机一启动，立即就折断，使测试结果不准。因此，可采用更小型的抗折试验机或老式加铅丸的杠杆式水泥抗折强度试验机。

4.2.10 热分析试验

任何物质随着温度的变化，其物理和化学性质也会发生变化，并伴随着有能量的吸入和放出，发生体积和质量的改变等，热分析法就是利用物质在加热过程中产

生吸热、放热的热效应，以及质量和体积的改变等特征，来判断某一物质的物相组成或其所含有的杂质、了解物质的热变化特征等，以达到对物质定性、定量鉴定的目的，而且从材料工学的需要来看，可以达到指导生产，控制产品质量的目的。

热分析的方法很多，电瓷行业应用最广泛的是热失量（失重）分析、差热分析和热膨胀与收缩的测定，本节先分别介绍热失量分析和差热分析的基本原理与基本方法，然后简单叙述差热和失量综合分析，而热膨胀与收缩的测定见瓷材料性能测定。

4.2.10.1 热失量（失重）分析

生产电瓷所用的原料矿物，特别是黏土矿物，在加热时会产生排除水分（如吸附水、结晶水、结构水等）、分解（如碳酸盐类放出二氧化碳气体）、氧化（如变价元素在高温下由低价变为高价而放出热量）及升华等反应。不同的物质，由于化学组成和结构的不同，因而在加热过程中，其质量变化特性也不一样，这就是热失（增）量分析的基础。大多数物质包括电瓷原料在内，在加热过程中都是质量减少，所以在热谱图上习惯将这种温度——质量变化曲线称为失量曲线。

热失量分析一般分为恒量法和连续法两种。恒量法是将试样在各个给定的温度下加热至恒量，然后算出试样质量损失的百分数；连续法则是在等速升温的加热过程中连续测试样的质量变化，然后以“温度—质量损失百分率”作图，得出热失量曲线。后者是一种常用的热失量分析法。

实践证明。凡是在加热过程中有失量的矿物，都具有各自热失量的特征，即典型的热失量曲线（可从有关资料中获得或实际测出）。测定出被测原料的热失量曲线后，与有关的矿物典型热失量曲线比较，可以鉴别该原料的矿物类型，从而为电瓷配方和制订烧成制度提供一定的依据。各类黏土矿物在加热过程中的失量百分率和失量曲线分别如表4.3-38和图4.3-37所示。热失量分析的主要仪器是热天平。最基本的热天平与普通天平不同的地方在于：热天平的左下方附加了一个加热电炉，热天平左方称盘下连有一悬钩，悬钩下有一小孔直通电炉。装有试样的试样盒可以用耐热金属丝挂在悬钩上，悬垂在电炉中加热，从而可在不同温度下进行称量。

表4.3-38 几种黏土矿物在加热过程中的失量百分率

高岭石（江西萍乡）		埃洛石（广东新丰）			蒙脱石（辽宁黑山）		伊利石（湖南醴陵王家场）		
温度（℃）	失重（%）	温度（℃）	失重（%）	温度（℃）	失重（%）	温度（℃）	失重（%）	温度（℃）	失重（%）
室温	0	室温	0	700	18.84	室温	0	室温	0
60	0.14	50	0	750	18.96	100	1.8	120	1.7
100	0.8	100	4.98	800	19.21	140	7.8	200	3.1
200	1.4	150	5.34	850	19.24	200	13.2	400	3.3
300	1.5	200	5.85	900	19.24	300	13.9	500	3.9
400	1.8	250	6.26	950	19.24	400	14.2	600	7.9
450	2.1	300	7.36	1000	19.24	450	14.4	700	8.3
500	2.9	350	10.64			500	14.5	800	8.4
600	12.7	400	17.78			600	14.9	900	8.4
700	13.5	450	17.78			700	16.2	1000	8.4
800	13.9	500	17.94			750	17.3		
900	14.0	550	18.54			800	17.3		
1000	14.0	600	18.69			900	17.3		
		650	18.74			1000	17.3		

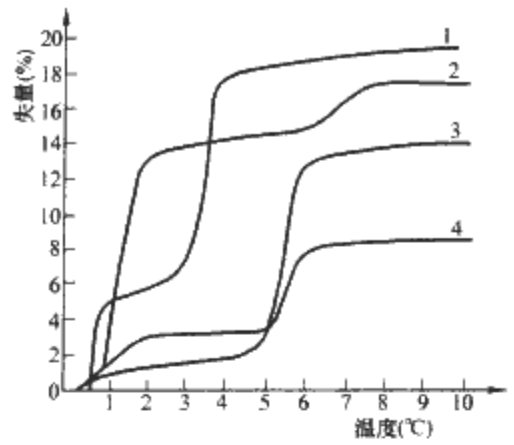


图4.3-37 几种黏土矿物的热失量曲线

1—埃洛石；2—蒙脱石；3—高岭石；4—伊利石

（1）仪器设备和器具。①热天平装置见图4.3-38，其中包括：②天平，分度值1mg；③加热电炉，管式的或坩埚式的；④调压变压器，调节电炉电压，控制升温速度；⑤测温毫伏计，配热电偶指示温度，0.5～1级，误差不超过±5℃；⑥热电偶：铂铑—铂或镍铬—镍铝；⑦金属丝：直径0.5mm以下，铂金属或镍铬丝；⑧试样盒：瓷或铂金小皿；⑨干燥器、计时钟等。

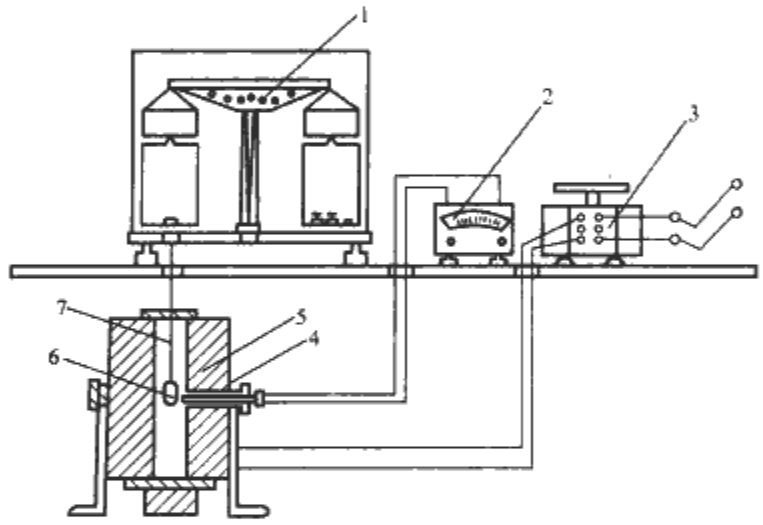


图4.3-38 热天平装置图

1—天平；2—测温毫伏计；3—调压变压器；4—热电偶；5—管状电炉；6—试样盒；7—金属丝

（2）试样制备。按取样方法取得的平均试样，破碎缩分后自然风干，经粉碎全部通过网孔尺寸为0.100mm的筛，置于一敞开的容器中，再将此容器放入盛有$Ca(NO_3)_2$饱和溶液的干燥器中，存放5昼夜。

（3）试验步骤：

1）将空试样盒（在测量温度范围内应是恒量的）用耐热金属丝挂在天平左边称盘下的小钩上，在右称盘上加砝码，使天平平衡。注意试样盒，其金属丝不要与炉壁及测温热电偶相碰，但试样盒又要接近热电偶热端，位于电炉内的高温等温区。

2）取下试样盒，将约0.5g试样放入试样盒内，再挂好，称量。

3）连接好加热和测温系统的电路，经检查正确无误后接通电源，转动调压器的调压盘，接电压——温度曲线调节电压，使炉温以每分钟5～10℃的恒定速度升温。

4）当炉温接近50℃时，启动天平旋扭称量，以后每隔10～50℃称量一次，一直试验到800～1000℃。失量大时，每次称量间隔的温度应小一些；失量小时，称量间隔的温度可以大一些。

(4) 计算和作图。

1) 在某温度下试样的失量计算见式 (4.3-24)。

$$B = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100 \qquad (4.3\text{-}24)$$

式中：B 为试样失量百分率，%；m_0 为试样原始的量，g；m_t 为某温度下试样的量，g。

2) 以温度为横坐标，失量百分率为纵坐标，绘制出试样的热失量曲线。

将试样的热失量曲线与相应的纯矿物典型热失量曲线比较，即可作为鉴定试样的矿物类型的依据之一。

(5) 注意事项：

1) 由于金属的传热性比瓷好，试样内的温度与炉温温差小，因此最好使用铂金试样盒。使用瓷试样盒的升温速度应慢一些，并且在使用前需灼烧（灼烧温度应高于试验温度）至恒量，或将已灼烧至恒量的试样盒放入干燥器中备用。

2) 升温速度一定要平稳均匀，要尽量避免或减少炉子热气流对天平的冲击。

3) 每次称量要迅速准确。在整个称量过程中，要注意勿使试样盒、金属丝与炉壁及热电偶相碰。

4) 为了使试样盒在天平盘下挂上和取下得方便，宜将悬挂试样盒的金属丝做成能方便连接和卸脱的几节。但其连接悬挂后，一定要保证整串呈垂直状态。此金属丝不能太粗，其直径应小于 0.5～0.3mm。

5) 当温度超过 800℃时，常产生增量现象，这主要是由于悬挂试样盒的金属丝（如镍铝丝等）氧化所致。用铂金丝悬挂，则可避免这种现象的发生。

4.2.10.2 差热分析

硅酸盐矿物在受热（或冷却）过程中，将会随着温度的变化而产生物理化学变化、如分解或化合、氧化或还原、晶型转变、固相反应、结晶或析晶、熔融与凝固等。这些变化往往都伴随着热效应，以吸热或放热的形式表现出来。由于每种矿物在受热条件下都会发生固有的物理和化学变化，因而各自在特定的温度范围内将产生相应的热效应值。通过测定矿物的这些热效应值，就可以了解各种矿物受热变化的特性及变化的实质，作为鉴定矿物类型的依据，并且在一定的条件下，还可以进行矿物类型的定量分析。

测定热效应值的简便而精确的方法是差热分析法。差热分析是在相同条件下加热被测试样和基准样（或称中性体），利用差热电偶测量被测试样温度和基准样的温度差与加热的温度作成曲线，即称差热曲线。

差热电偶是由两支相同热电偶的同种极相联而组成的。差热电偶的线路图和工作原理如图 4.3-39 所示。差热电偶的一个热端插在试样内，另一个热端插在基准样内（对基准样的要求是，在所测的温度范围内不发生任何热效应，并且其热容、热导率等均应近似于被测试样），将装有试样和基准样并插好了差热电偶的试样盒放入电炉中。升温时，若试样和基准样的温度相同，则差热电偶两个热端所产生的热电势相等，因为它们是同极相联，热电势互相抵消，这时连接在线路中的检流计中无电流流过，检流计无读数，即光点（或指针）位置不发生偏移，相应的差热曲线表现为一水平线，见图 4.3-40 中的 ab 部分。如果试样在某温度下发生了吸热或放热效应，即试样与基准样之间产生了温度差，差热电偶的两个热端产生的热电势不等，不能相互完全抵消，即产生了热电势差值，此时有电流流过检流计，光点位置就向一方偏移。由于试样的吸热和放热，使差热电偶两个热端温度高低正好相反，流过检流计的热电势电流方向也就相反，从而使光点偏移的方向相反。试样产生的热效应越大，则热电势之差值越大，检流计上的光点偏移也越大。这样就如图 4.3-40 的差热曲线上形成的相应吸热谷 e 或放热峰 f。图 4.3-39 中的毫伏温度计是用于测量加热温度的，由此可知试样发生热效应时的相应温度。从下面介绍的差热分析试验，即可了解掌握差热分析的基本方法。几种典型黏土矿物的差热曲线如图 4.3-41 所示。

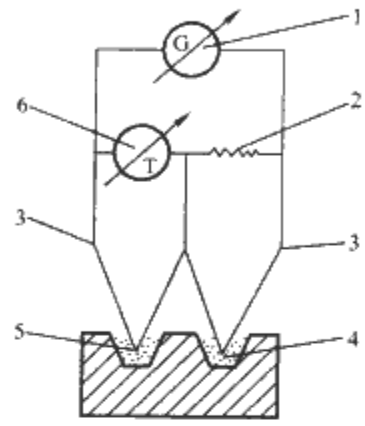


图 4.3-39 差热电偶线路和工作原理示意图
1—检流计；2—平衡电阻；3—冷端点；4—基准样及差热电偶热端；5—被测试样及差热电偶热端；6—温度计

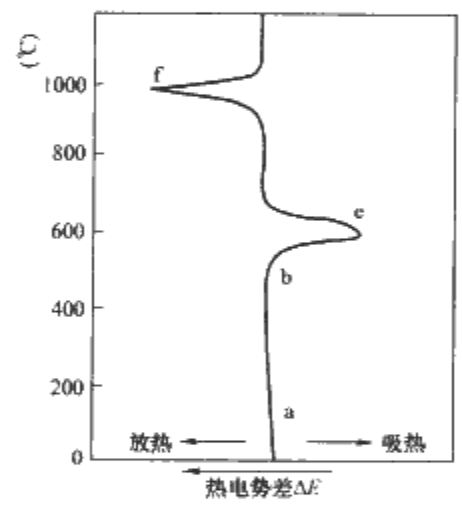


图 4.3-40 某矿物的差热曲线

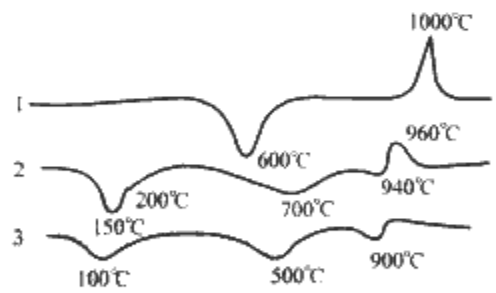


图 4.3-41 几种典型黏土矿物的差热曲线
1—高岭石；2—蒙脱石；3—伊利石

(1) 仪器设备。简易差热分析试验基本装置如图 4.3-42 所示，其中仪器设备包括：① 调压变压器：调节电炉电压，控制升温速度；② 管式电炉；③ 试样盒：铂金或镍、瓷质；④ 差热电偶：铂铑—铂或镍铬—镍铝；⑤ 保温瓶：放差热电偶和测温热电偶的冷端；⑥ 测温毫伏计：配热电偶指示温度，0.5～1.0 级；⑦ 电阻箱；⑧ 光点检流计：精度为 10^{-8}～10^{-10} A/cm。

(2) 试样制备。试样制备与热失量分析的相同。

(3) 试验步骤：

1) 按试验仪器装置图检查仪器及线路，准确无误后开

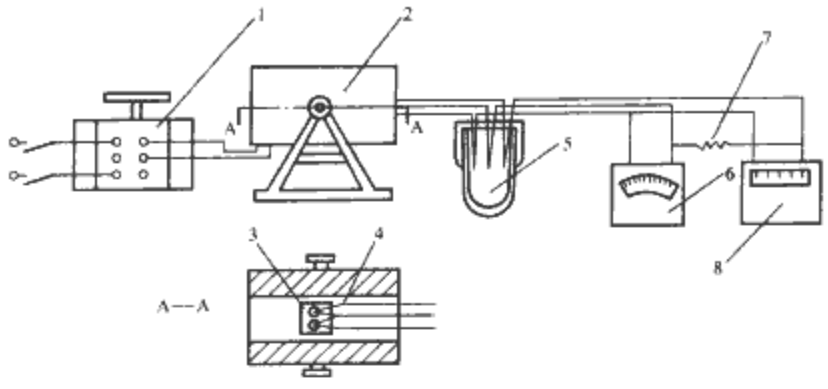


图 4.3-42 简易差热分析试验基本装置图

1—调压器；2—管式电炉；3—试样盒；4—差热电偶；5—保温瓶；6—测温毫伏计；7—电阻箱；8—光点检流计

始试验。

2）确定试样发生吸热或放热反应时检流计光点移动的方向：取出差热电偶和试盒，接通光点检流计的电源并进行调零，然后用手指接触差热电偶的任一热端，借手温产生温度差，使两热端产生热电势差，有电流流过检流计，光点位置移动，此时光点若从中央零位向左移动，则表示该热端插入试样内试样发生放热反应时，光点应从中央向左移动；若试样发生吸热反应时，光点则应从中央向右移动。将接触试样的热端及吸热或放热移动的方向作好记号。

3）装试样。将差热电偶的两个热端按上述已经确定的位置分别插入试样盒的两个盛样孔中，再分别在盛样孔中装入基准样和试样。为使装填的试样和基准样松紧适中，可用小棒弹敲试样盒，以便自由堆填紧密。在装填过程中，应注意将差热电偶的热端点置于孔内的正中，并使热端点被周围的试样或基准样均匀地掩埋。

4）装好样后，将试样盒连同差热电偶放入电炉的高温等温区，然后再调节检流计的零点。

5）接通电炉电源，按照“电压—炉温曲线”调节电压。使电炉以每分钟 10℃左右的速度均匀升温。

6）从开始升温起，每间隔 10℃记录一次检流计的读数和温度读数。当检流计中有电流流过，光点出现偏移时，表明试样产生了吸热或放热效应，应迅速将光点从偏移开始、最大和结束时整个过程的相应温度、检流计光点偏移方向和偏移的格数记录下来。当检流计光点回到零点或某一位置和变化平缓时，又每间隔 10℃记录一次温度和检流计偏移格数。这样重复操作直到温度升至规定结束的温度为止。记录时，应该将检流计光点偏移方向（向左还是向右，即是吸热还是放热）注明。

（4）试验结果作图和分析。

1）根据记录的数据，在坐标纸上，以横坐标为温度，纵坐标为温差（检流计光点偏移的格数），作出差热曲线，并标出吸热和放热的起点、峰值及结束点的相应温度。

2）分析所制差热曲线的形态、特征及相应的温度，并与有关矿物的典型差热曲线比较，鉴定试样的矿物类型，即定性分析。进行定量分析比较复杂，必须预先试验作出一系列已知矿物组分的标准差热曲线才能进行比较分析。

（5）注意事项：

1）差热分析是一个热动力过程，试样需要在一定的温度条件下才能进行热反应，因此，热反应的进行与单位时间内供给试样的热量及试样本身的传热性质、反应速度等有关。反应速度较快的试样，只要达到某一反应温度，就能瞬时全部反应，形成明显的放热峰或吸热谷。在这种情况下，加热速度的影响就不明显，如石英的晶型转变等。

$$\beta\text{—石英} \xleftrightarrow{573℃} \alpha\text{—石英}$$

反应速度中等的试样，当升温较慢时，反应时间拉得较长，热效应分散，可能尚未到达剧烈反应的温度，试样中应该反应的大部分已经反应完毕，因而形成放热峰或吸热谷比较平缓；当升温较快时，形成的峰或谷的温度滞后（即偏高），峰形变得尖而窄，对于具有相邻的放热峰或吸热谷的试样，由于升温速度太快，还会造成峰或谷重叠现象，如白云石等；反应速度慢的试样，因为加热过程中反应速度迟缓，形成的放热峰或吸热谷不易观察，因此应用差热分析的方法难以得到令人满意的结果。另外，由于硅酸盐材料的导热性能较差，其试样在加热过程中均会出现内外层之间的温度差，升温速度太快，会使内层与外层的温度差增大，所以对这类试样，应选择较慢的升温速度，使试样内层与外层的温差减小，才会不影响试样的正常热效应。因此，在进行试样的差热分析时，合理地选择升温速度是很重要的。在选择升温速度时，除了考虑试样的反应速度和导热性能外，还应考虑到基准样、电炉、试样盒的特性以及仪器的灵敏度等。合理的升温速度，可以得到令人满意的、反映试样热效应特性的差热曲线。电瓷原料及坯釉料的差热分析试验的升温速度一般选择每分钟 10～15℃为宜，并且在整个试验过程中升温速度应保持均匀一致。

2）试样颗粒大小。试样颗粒大小不同，其热反应特性、导热性质等也会有差异，因此得出的差热曲线，其热峰（或谷）的形状、面积和峰（或谷）值及相应温度也不一样。试样颗粒较大，受热时不易均匀，热峰（或谷）值温度滞后（即增高），峰（或谷）的形状比较平缓（即温度范围增宽），试样颗粒小则反之。当试样颗粒细度达到一定程度时，颗粒大小与其热效应特性趋于稳定。硅酸盐矿物进行差热分析时，一般采用通过网孔尺寸为 0.100～0.150mm 筛的粉料，并且基准样也用同一颗粒细度。

3）试样量。试样量对差热曲线也有影响。试样量较多时，试样的容积相对增大，热效应放出或吸入的热量，由周围传递到中央热电偶的距离增长，使热效应产生的时间延长、范围扩大，影响峰（或谷）值，同时相应温度滞后（即增高），总的峰（或谷）形面积增大；试样量少时（尚能连续包围住差热电偶的热端点）一般产生小而窄的峰（或谷）形，而且能减少邻近的峰（或谷）之间的重叠可能性。因此在试样能连续包围住差热电偶热端点的前提下，试样不宜过多。大多数差热分析仪的试样量为 50～500mg。

4）试样的装填。试样装填的松紧程度不同，其热容和传热性能也不一样，因而热效应峰（谷）的形状、峰（谷）值及相应温度等就有差异。因此，每次装填试样必须保持一致，基准样与试样也要一致。对于在加热过程中产生气体分解物少的试样，可以采用紧密装填，以减弱基线漂移的影响。

5）试样盒材料及其几何尺寸。试样盒材料及几何尺寸不同，其热传导性和热容就不一样，因而会影响差热曲线的形态。一般金属材料（如镍、铂及其合金）的试样盒，由于导热性好，热容量小，很少产生基线偏移，容易得到令人满意的差热曲线。而非金属的试样盒，因其导热性差，热容大（如莫来石，刚玉等），常产生基线偏移，热峰（谷）形状变异等现象。为减少非金属材料试样盒的热学性质对差热曲线形态的影响，一般宜选取直径较小、高度略大于直径的圆柱形试样盒。值得注意的是，在试验的温度范围内，用于做试样盒的金属或非金属材料，无论在化学反应方面，还是在温

化作用方面，对基准样及试样的所有组分及其分解产物都必须是完全惰性的。

6）热电偶。热电偶热端点大小不同，其热端点在试样中的位置不同，差热曲线的热峰形状也就不同。同时，由于热电偶丝的热传导带走试样产生热效应的部分热量，也会使差热曲线的形态改变。因此在试验时，应尽量使热电偶热端点位于试样和基准样的中心位置，并且每次试验时，其位置应恒定。为减少热电偶散热损失的影响，通常选用热电偶丝的直径为 0.3～0.5mm。

7）基准样。基准样在整个试验过程的温度下，应不发生任何物理化学变化和热效应，其导热性和热容量应与试样相接近。因此，在进行电瓷原料和坯釉料的差热分析时，基准样一般采用煅烧过的高岭土或煅烧的工业氧化铝粉等，其煅烧温度应高于试验的最高温度。

此外，试样加热时的压力、气氛及加热电炉的感应电流等，使基线漂移，对差热曲线的形态也有影响。因此，可采取相应的措施，以消除或减轻其影响。例如：采用真空状态试验，以消除气氛的影响；将试样盒用金属网屏蔽起来，以减少电炉感应电流的影响等。

4.2.10.3 差热和失量综合分析

科学技术的发展要求在相同的试验条件下，尽可能多地获得表征试样特性的各种信息，以便于分析、比较，从而对所测试样作出比较正确的判断。因此仪器的综合化是分析仪器发展的方向。为适应科学研究和生产实践的需要，热分析法也有必要把各个单独的仪器（如差热分析、失量分析、线膨胀系数测定等）组合在一起，使之在相同的试验条件下，得到关于试样热变化的各种信息的数据，这就是综合热分析仪。

随着电子技术的发展，目前使用的热分析仪，无论在结构和性能上都有很大的改进，基本上脱离了手工操作和记录，实现了控温、称量、记录的自动化。20 世纪 70 年代电子计算机已开始在热分析仪上应用，这不仅使热分析自动化程度更高，而且能储存大量试验数据，可对不同试样的测试结果进行对比分析，使热分析结果更加准确可靠。目前使用的综合热分析仪或热谱仪型式很多，其仪器结构装置、具体的工作原理及操作步骤等由具体仪器而定。在此不一一详细介绍。

4.2.11 黏土耐火度测定

黏土的耐火度是黏土的高温性质之一。黏土是由多种成分组成的物质，无一定熔点，只是在一定的温度范围内逐渐软化。在一定的条件中，将黏土物质在高温作用下发生的某种程度软化的相应温度称为黏土的耐火度。

测定黏土的耐火度，通常是用截头三角棱形锥体—试锥，在固定的升温速度加热下，由于温度的作用，试体中生成液相，随着液相黏度降低而逐渐软化，同时，由于试体本身重力作用而向下弯。当试锥的顶点和耐火底盘接触时，此时的温度即为该试锥的耐火度。试验中，将试锥与标准测温锥弯倒情况相比较来确定试锥的耐火度温度。

黏土的耐火度主要取决于它的化学组成，随着氧化铝、氧化硅、碱性氧化物的含量不同而变化。通常 Al_2O_3 含量高的黏土耐火度也高；含碱性氧化物高的黏土，耐火度则较低。对于 Al_2O_3 含量为 20%～50%的黏土来说，可根据化学分析结果用下列经验公式（4.3-25）初步计算耐火度。

$$T = \frac{360 + Al_2O_3 - RO}{0.228} \qquad (4.3\text{-}25)$$

式中：T 为耐火度，℃；Al_2O_3 为黏土中 $Al_2O_3 + SiO_2 = 100\%$时，Al_2O_3 所占的百分含量；RO 为黏土中 $Al_2O_3 + SiO_2 = 100\%$时，相应带入的其他杂质氧化物（如：Fe_2O_3、CaO、MgO、K_2O、Na_2O 等）的百分含量。

此外，试验的加热速度、炉中的气氛、黏土的粉碎程度、试样形状、装样方法等都会影响黏土的耐火度，因此在试验中必须注意，严格按试验要求进行。

根据耐火度的高低，可以将黏土分为耐火黏土、难熔黏土和易熔黏土三类。黏土原料的耐火度愈高，其烧结温度也愈高，且熔融温度范围也愈宽，将其用于电瓷坯料中，可以增宽坯料的烧成范围。

（1）设备和器具。①耐火度测定炉：最高允许工作温度应高于试样的耐火度温度，一般应达到 1800℃；②光学高温计；③制备试锥和耐火底盘用金属模；④玻璃板、小刀、时钟；⑤石棉手套，看火眼镜；⑥烘箱；⑦糊精水溶液：浓度约 10%。

（2）试样和耐火底盘的制备。

1）按取样方法取得的黏土平均试样，破碎缩分后取 100g 左右，再粉碎至全部通过孔径为 0.2mm 的筛。然后在试样中加少量的水（适宜于半干压用的水分）拌匀，稍加陈腐。称一定量的试样（约 1g）倒入金属模中，压制成高 30mm，下底边长为 8mm，上顶边长为 2mm 的截头三角锥，其中有一棱垂直于底边。

2）用高铝料加糊精水溶液拌匀，用金属模压制成耐火底盘。

3）将制备好的试锥和耐火底盘放在垫有纸的玻璃板上，移入烘箱中烘干，冷却，修整好。

（3）试验步骤：

1）按下列要求安插试锥和标准锥：

①测定一种黏土的耐火度，必须同时用 3 个试锥和 3 个与试锥相比较用的 3 种不同标号（温度）的标准锥。标准锥标号（温度）的选择，应根据该黏土的化学成分利用式（4.3-25）初步计算出的耐火度温度来确定。

②将 3 个试锥和 3 个标准锥相互错开，一起插入耐火底盘的 6 个预留孔穴中。所有试锥和标准锥与底盘中心的距离要一致，且互相间距离不少于 5mm。锥的下端棱角距底盘周边 5mm。插标准锥时，将有号码的锥面向着底盘的中心，而与该面相对的棱垂直于底盘台面。插试锥也需如此。插入深度为 2～3mm，6 个锥的深度应一致。安插时，用细的高铝粉料加糊精水溶液作胶粘剂，使锥固定在耐火底盘上，然后再烘干。

2）将装好试锥和标准锥的耐火底盘放入炉中最高温度区域的等温区。底盘应保持水平，并且锥和底盘的圆周不与炉膛接触。

3）接通电炉电源，电炉开始升温。在 1000℃以下可以不控制升温速度，1000～1500℃以 10～15℃/min 的速度升温；1500℃以上以每分钟 5℃的速度升温。同时用光学高温计每隔 5min 测量一次温度，注意观察试锥和标准锥的弯倒情况，两个相邻号的标准锥弯倒时间应相差 3～6/min。在加热过程中，炉内试样部分的温差应不超过 10℃，炉中保持中性或氧化性气氛。

4）当任一试锥的顶端弯倒接触耐火底盘时，均需立即观察并记录标准锥的弯倒程度，至最后一个试锥的顶端弯倒接触耐火盘后，方能停止试验。

（4）结果表示：

1）试锥与标准锥的顶端同时弯倒接触耐火底盘时，则用此标准锥锥号温度表示试样的耐火温度；若试锥的弯倒介于两个相邻标准锥弯倒之间，则用这两个标准锥锥号之间的

温度来表示，即试样的耐火度是某一温度到某温度，或者用两个标准锥锥号温度的平均值来表示。上述两种情况也可以直接用标准锥锥号表示即可。

2）同一种试样的3个试锥的弯倒偏差，应不得大于半个标准锥号（即10℃）。

（5）注意事项：

1）不得重复使用在试验时尚未弯倒的标准锥和试锥。

2）温度到达1300℃以上，由于某种原因而使试验中断时，不得重复使用这次试验中用过的试锥和标准锥。

3）任一试锥或标准锥弯倒不正常，如弯倒不是对准外边、锥体上下部熔融不一致，则试验必须重做。

4.3 坯料性能试验

为了使电瓷产品在制造过程中具有良好的工艺性能，获得满意的瓷质性能和产品品质及较高的合格率，在进行坯料配方研制及正常生产中对坯料性能抽查时，都必须对坯料的物理性能进行测定，以作为选择原料、确定配方、制订工艺规程和评定生产中的坯料性能是否稳定等的依据。

坯料的物理性能试验有：坯料的水分、真密度、细度、颗粒组成；泥浆性能—黏度、流动度与厚化度、密度、铁杂质含量、电解质试验；可塑成形性能—可塑性指数、可塑性指标及相应含水率、可塑度系数、湿坯耐压强度和耐压指标；干燥性能—干燥强度、吸湿强度、线收缩率、体积收缩率、孔隙率、干燥灵敏指数、干燥失量与收缩率及速率；烧成性能—加热膨胀收缩曲线、烧成温度范围、线收缩率、体积收缩率；以及总线收缩率和总体积收缩率等。

4.3.1 浆料的密度和弹性系数的测定

4.3.1.1 浆料密度的测定

浆料（泥浆和釉浆）的密度是指它的质量与其所占的体积之比值，即单位体积浆料的质量。

一般来说，浆料的密度大小与干物料（坯料和釉料）的真密度和其含水率有关。在生产中，当配方不变的情况下，浆料中干物料（坯料和釉料）的真密度不变，浆料的密度与其浓度成正比，与水分含量成反比。因此，往往采用通过控制浆料的密度来控制其浓度。如上釉时，为使产品釉层厚度适当，且操作方便，常常是用控制釉浆密度的方法来保证釉浆具有合适的浓度。同样，通过测定浆料的密度，可以计算出浆料的含水率。测定浆料密度的方法有比重计法、比重瓶法和韦氏天平法。

方法一 比重计法

比重计测定浆料密度的方法简单方便，测定时，将比重计插入盛有浆料试样的器皿中，比重计下沉，当它排开的浆料重量等于它自身整个重量时，比重计就停留在浆料中一定深度的位置上稳定不变，此时读得浆料液面处比重计上的刻度值，即为浆料的密度。

浆料的稠度、表面张力、温度等都会影响比重计测得密度值的准确性，浆料愈稠，表面张力愈大，比重计测得的密度值偏差愈大；温度高，测得的密度值偏小。因此，用比重计测定浆料密度的准确性较差。

（1）仪器和器具：① 波美比重计：测量范围1.00～2.00g/cm^3；②量筒：容积1000mL；③玻璃棒、湿布等。

（2）试样制备：

1）在坯料、釉料配方试验和工艺试验及生产中，测定泥浆和釉浆的密度时，可直接取样测定。

2）测定不同水分的泥浆和釉浆的密度时，可先将泥浆和釉料烘干、粉碎。过网孔尺寸为0.15mm的筛，每次取1000g，按不同的水分值计算加水量，边加水边搅动，直至溶解混合成为均匀的浆料，然后通过网孔尺寸为0.15mm的筛。

（3）试验步骤：

1）将制备好的试样倒入量筒内，用玻璃棒搅拌均匀，待浆料静止后立即进行测定。

2）正式测定前，先用湿布将比重计轻轻抹湿，然后用手持比重计，缓慢地将它垂直插入量筒内，并且手随比重计一同下降，当手感到不需要持力时，才松开手，此时比重计还略微有点下降。静止半分钟后，读出比重计上平行于浆料液面的刻度值，即为该试样的密度。

（4）计算。浆料密度为3次测定的平均值，计算到小数点后第2位。3次测定值之间的误差不应超过0.02g/cm^3。

（5）注意事项：

1）每次测定前，应将试样搅拌一次，比重计表面粘附的试样应抹干净。测定时，一定要垂直插入量筒中间，不能与筒壁碰擦。

2）在生产中，比重计可直接测定大容器（如上釉缸）中的浆料密度。测定前应将全容器中的浆料充分搅拌均匀，静止后立即进行测定，测定步骤相同。

方法二 比重瓶法

比重瓶法是在已知质量的比重瓶中装满浆料试样后称量，再倒出试样装满蒸馏水称量，根据试验温度下水的密度（见表4.3-33），得出比重瓶的精确容积。根据试样的质量和它的体积（即比重瓶的容积），计算出试样的密度。

与比重计法比较，比重瓶法的测定结果精确度高，但其方法复杂一些，要求高一些，测定的时间也较长。

试样的制备与比重计法相同。

方法三 韦氏天平法

韦氏天平测定浆料（液体）密度的示意图见图4.3-43。当挂在天平右端具有标准体积与重量的测锤浸没在液体中时，因液体对测锤产生的浮力使天平失去平衡。此时加上天平所附的与测锤相配合使用的各种骑码，以使天平平衡，读取所加骑码代表的数值，即为被测液体的密度。韦氏天平测定液体的密度，可精确到小数点后第4位，测定准确度高。但与比重计法比较，操作要复杂一些。

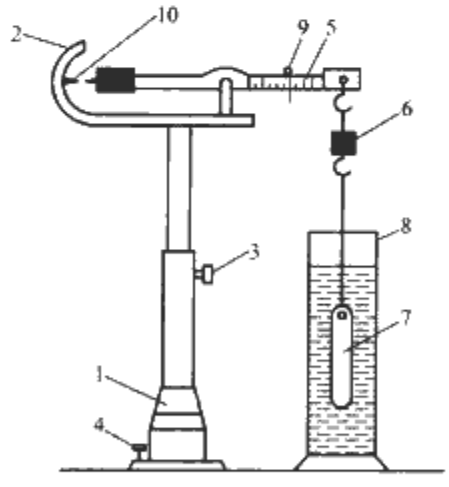


图4.3-43 韦氏天平及其测定液体（浆料）密度示意图

1—天平承座；2—天平支架；3—活动螺旋；4—调节螺旋；5—天平梁所示安装好，横架升至适当高度；6—两头带挂钩的砝码；7—测锤；8—置筒（内盛被测试样）；9—骑码

（1）仪器和器具：①韦氏天平：见图4.3-43，测定液体（浆料）的密度范围为0～2.000 0g/cm^3，误差不超过±0.000 5g/cm^3；②温度计、烧杯、玻璃棒等。

（2）试样制备。试样制备与比重计法相同。

（3）试验步骤：

1）把韦氏天平秤梁按图 4.3-43 所示置于横架的玛瑙刀座上，将 15g 的砝码挂在秤梁右端的挂钩上，调整底脚上的调节螺旋，使秤梁平衡（左端锥尖对准横架上的固定锥尖）。取下 15g 的砝码，换上两头带挂钩的砝码，再挂上测锤，秤梁亦应平衡。

2）在量筒内加入蒸馏水 100mL，将测锤放入量筒内浸没于水中，并在整个液体高度的中央处，此时，秤梁失去平衡。在秤梁上加放各种骑码使之平衡，按骑码代表的数值读出蒸馏水的密度，同时，用温度计测量量筒内水的温度，查表4.3-33中该温度下水的密度。如果与读取的密度值相符，则说明零点准确，仪器正常。读出量筒内水面高度，再倒出蒸馏水。

3）将制备好的试样（泥浆或釉浆）搅拌均匀后，倒入上述量筒中，将测锤放入量筒内，浸没于试样中，此时试样在量筒内的高度应与测蒸馏水时相同。同样测锤也应位于量筒内整个试样高度的中央处，在秤梁上放各种骑码，使之平衡，读取所加骑码代表的数值，即为试样的密度。

（4）读数方法：

1）秤梁上的“V”形槽与各种骑码皆为 10 进位。

2）各种骑码放在秤梁不同“V”形槽位置代表的密度值见表 4.3-39。

表 4.3-39 各种骑码放在秤梁上不同位置代表的密度位

骑码的质量（g）	5	0.5	0.05	0.005
各种骑码放在右边挂钩上（第 10 位）代表的密度值（g/cm³）	1	0.1	0.01	0.001
各种骑码放在秤梁“V”形槽第 9 位代表的密度值（余数类推）（g/cm³）	0.9	0.09	0.009	0.000 9

3）从大到小依次读出秤量上“V”形槽上的骑码数值，即试样的密度值。例如：测定 30℃的纯水密度值时，使秤梁平衡所加各种骑码的位置如下：骑码的质量（g）：5 、0.5、0.05、0.005，在秤梁上的位置为第 9 位、第 9 位、第 7 位、第 4 位，读出水的密度值为 0.997 4g/cm³。

（5）注意事项：

1）测锤应全部浸没在液体中，浸没的深度用蒸馏水校准。正式测定试样时，测锤放置位置应与测蒸馏水时相同。

2）悬吊测锤的细铂金丝容易断，玻璃制作的测锤容易碎，操作时要小心。

4.3.1.2 弹性系数的测定

用比重计测定泥浆和釉浆的密度值，将受其温度、稠度、表面张力等因素的影响。而用比重瓶测定时，基本与上述因素无关。因此，用比重计和比重瓶测定同一泥浆或釉浆时，其密度值往往有一定的差异，二者的差值称为弹性系数。因此，弹性系数表示了泥浆和釉浆的稠度、表面张力等性质。一般浆料的弹性系数越大，表示其稠度、表面张力也越大，反之亦然。

弹性系数＝用比重计测定的密度值—用比重瓶测定的密度值

4.3.2 黏度和流动度及厚化度测定

泥浆和釉浆在外力作用下产生流动时，因存在内部摩擦，使两平行的浆层流动速度有差异，称这种特性为粘滞度，即黏度，或称内摩擦系数。流动度是黏度的倒数，黏度愈大，流动度愈小，即流动性愈差，反之亦然。当流动着的泥浆和釉浆静止后，因黏土片状颗粒带有某种电荷，形成所谓“卡片状结构”，重新凝聚而稠化，这种现象称为泥浆和釉浆的稠化性，稠化的程度即为厚化度。泥浆和釉浆的黏度、流动度与厚化度决定于坯料和釉料的配方组成和黏土的性质、颗粒细度、水分含量、温度、添加电解质的种类和数量等。泥浆和釉浆的粘度和厚化度不同，对球磨、浆料输送、过筛除铁、榨泥及上釉等工艺的影响也不同，特别是注浆法成形时，将直接影响浇注制品的品质。因此，测定泥浆的黏度和厚化度对正确地制订相应的工艺和工艺控制、或对泥浆和釉浆性能进行适当的调整、改善工艺性能、提高产品品质都具有一定的意义。

4.3.2.1 黏度的测定

黏度有两种表示方法：绝对黏度和相对黏度。测定绝对黏度的方法有旋转黏度计、扭力式黏度计等；相对黏度的测定方法有恩格列尔黏度计、科尔黏度计、落球法等。电瓷泥浆和釉浆一般采用旋转式黏度计测定绝对黏度，用恩格列尔黏度计测定相对黏度。

（1）绝对黏度的测定。NDJ—1 型旋转式黏度计结构原理示意图见图 4.3-44，同步电机以稳定的速度旋转，连接着刻度圆盘，再通过游丝和转轴带动转子旋转。如果转子未受到液体的阻力，则游丝、指针与刻度圆盘同速旋转，指针在刻度盘上指出的读数为零。反之，如果转子受到液体的粘滞阻力，则游丝产生扭矩，与粘滞阻力抗衡，最后达到平衡。这时与游丝连接的指针在刻度圆盘上指示一定的读数（即游丝的扭转角）。将该读数乘上特定的系数，即得到液体的绝对黏度。

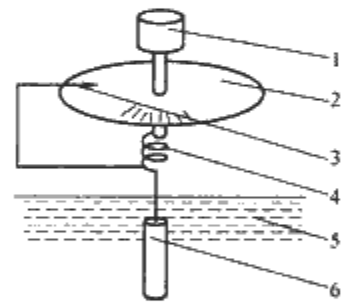


图 4.3-44 NDJ—1 型旋转式黏度计结构原理示意图

1—同步电机；2—刻度圆盘；3—指针；4—游丝；5—被测试样；6—转子

NDJ—1型旋转式黏度计的适应范围很广，量程为 0.000 1～100Pa·s。该仪器使用方便，只要用深度稍超过转子长度的杯子盛满泥浆或釉浆，放入转子，开动仪器，很快就可以测得绝对黏度值。如果采用“引伸索”，可以直接在釉缸中测定。当固定了测量条件，同一泥浆或釉浆重复测定多次，可以得到差别很小、前后一致的数据，其重复性好。

1）仪器和器具：①NDJ—1 型旋转式黏度计，测定范围为：中黏度使用 1、2、3、4 号 4 种转子，可测定 0.01～100Pa·s；低黏度使用 0、1、2、3、4 号 5 种转子，可测定 0.000 1～100Pa·s，测量误差为±5%，转子转速为 6r/min、12r/min、30r/min、60r/min；②温度计，玻璃棒等；③烧杯或直筒容器，直径不小于 70mm。

2）试样制备。试样制备与比重计测定浆料密度的试样制备相同。

3）试验步骤：

a. 将制备好的试样搅拌均匀，量取约 400mL 放入烧杯

或直筒容器中，准确地测量温度。

b. 旋下黄色套圈，将保护架装在仪器上，把选配好的转子旋入连接螺杆，旋转升降旋钮，使仪器缓慢地下降，转子逐渐浸入被测试样中，直至转子上的液面标志和试样液面相平为止，调整仪器水平。

c. 按下指计控制杆，开启电机开关，转动变速旋钮，使所需转速数向上，对准速度指示点，放松指针控制杆，使转子在试样液体中旋转。经过多次旋转（一般20～30s），待指针趋于稳定（或按规定读数的时间）按下指针控制杆，使读数固定下来，再关闭电机，使指针停在读数窗内，读取读数。

d. 当电机关停后，若指针不处于读数窗内，可继续按住指针控制杆，反复开启和关闭电机，使指针停于读数窗内，读取读数。当指针所指的数值过高或过低，可变换转子和转速，使读数约在30～40格之间为佳。

4）计算。试样的绝对黏度计算见式（4.3-26）。

$$H = K\alpha \tag{4.3-26}$$

式中：H为试样的绝对黏度，Pa·s；K为系数，Pa·s/每格，见表4.3-40；α为指针所指读数（偏转角度格数）。

表4.3-40 计算系数K（$\times10^{-3}$Pa·s/每格）

转子编号	K			
	60 (r/min)	30 (r/min)	12 (r/min)	6 (r/min)
0	0.1	0.2	0.5	1
1	1	2	5	10
2	5	10	25	50
3	20	40	100	200
4	100	200	500	1000

5）注意事项：

a. 量程和转子、转速的选择。先大约估计被测试样的黏度范围，然后根据各种转子与相应转速下的量程，适当地选择转子和转速。各种转子与转速下的量程即为表4.3-40中的K值扩大100倍。例如：2号转子为6r/min，量程$=K\times100=50\times100\times10^{-3}$Pa·s$=5$Pa·s；3号转子为30r/min。量程$=K\times100=40\times100\times10^{-3}$Pa·s$=4$Pa·s。若测定黏度为3Pa·s左右的试样，则可选择上述2号或3号转子及相应的转速。

当估计不出被测试样的大致黏度时，应假定为较高的黏度，试用由小到大的转子和由慢到快的转速。原则是高黏度试样选用小的转子，慢的转速；低黏度的试样选用大的转子和快的转速。

泥浆和釉浆中的颗粒在水中悬浮的稳定性较差，黏度会随时间而改变，变换各种转速测出的结果也会不太一致。要较准确地测定泥浆和釉浆的黏度，则要经过试验选择后，规定转子、转速和测定时间，以及试样的温度范围（能恒温最好）等。例如，测定白釉和棕釉的釉浆黏度时，一般情况下可固定采用2号转子，转速为30r/min，并经过旋转30s开始读数，以1min内几次读数的平均值作为计算黏度的读数值。

b. 仪器必须在指定的频率（50Hz）和电压允许偏差范围内（220V±10V）测定，否则会影响测量精度。当使用电源频率不准时，可按下式修正：

$$\text{实际黏度}=\text{指示黏度}\times\frac{\text{名义黏度}}{\text{实际黏度}}$$

c. 要测得较精确的黏度值，应做到以下方面：精确地控制被测试样的温度；将转子以足够长的时间浸于被测试样中，使其和被测试样温度一致，保证试样的均匀性；测定时尽可能将转子置于容器中心；防止转子浸入试样时有气泡附粘于转子上面；变换转子或转速，使刻度圆盘上的读数偏高些；使用保护架进行测定；保证转子的清洁；黏度低于0.015Pa·s的试样选用0号转子。

d. 仪器应在常温下使用，不得在未按下指针控制杆时开动电机和变换转速。

（2）相对黏度的测定。恩格列尔黏度计见图4.3-45。先将蒸馏水装入黏度计内筒中，待稍静置后，测定流出100mL蒸馏水所需时间。然后将试样倒入，在相同的条件（温度和压力）下，待试样静置30s，测定流出100mL试样所需的时间。两者流出时间之比即为泥浆或釉浆的相对黏度。

1）仪器和器具：① 恩格列尔黏度计见图4.3-45，主要由两个圆筒形的容器套装组成，外圆筒用于装恒温溶液（水），内圆筒装试样，其中心有一个圆锥形小孔，试样由此孔流出。一般测定泥浆用直径为6mm的流出孔，测定釉浆用直径为3mm的流出孔；② 黏度计容量瓶（中间有100ml刻度线）；③ 秒表、温度计（0～100℃）；④ 搪瓷杯、玻璃棒等。

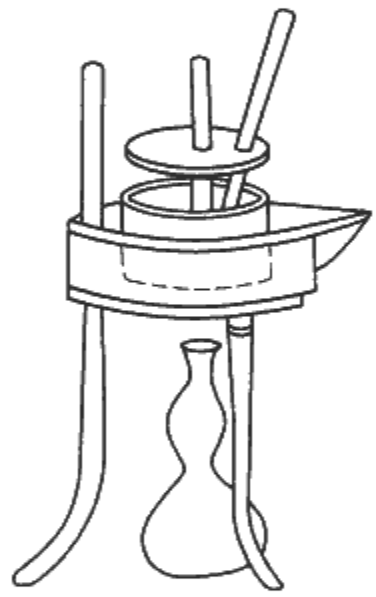


图4.3-45 恩格列尔黏度计

2）试样制备。试样制备与比重计测定浆料密度的试样制备相同。但在制备测定不同水分的泥浆和釉浆黏度时，每个试样制备好后的容量约为500mL即可。

3）试验步骤：

a. 把恩格列尔黏度计内外容器洗净、擦干，放在没有阳光直射和没有震动的平台上。调节黏度计3个支脚架的螺丝，使之水平。检查水平的方法是：在黏度计的内层容器内加水至3个尖顶处，调节支脚螺丝，使3个尖形标志的尖顶处在同一水平面上。

b. 把黏度计容量瓶放在黏度计流出口下面，瓶口中心与流出口中心应对准。检查是否对准的方法为：可在黏度计中加入水，使之流出，调整瓶的位置，使之刚好对准，然后在放瓶的地方画上记号。

c. 在黏度计外层容器内加入水，并使水温保持在(20±2)℃，以使各次测定的试样温度恒定。当水温达不到此值时，可接通黏度计的加热器，或用酒精灯加热；水温过高时，可用冷水或冰降温。

d. 将黏度计的流出口用塞棒塞好后，将制备好的试样

充分搅拌均匀，借助于玻璃棒慢慢地倾入黏度计内层容器中，至恰好盖住 3 个尖形标志为止。此后，再将试样仔细搅拌 5min，静置 30s，立即拔起流出口的塞棒，同时启动秒表计时。

e. 眼睛平视容量瓶的 100mL 刻度线，试样一流满至刻度线，立即关住秒表，并用塞棒塞住流出口，记下时间。用上述方法对同一试样测定 3 次。

f. 用以上同样方法和条件，测定流出 100mL 蒸馏水所需的时间。

4）计算。相对黏度的计算见式（4.3-27）。

$$\eta_{\text{相}} = \frac{t_1}{t_0} \tag{4.3-27}$$

式中：$\eta_{\text{相}}$ 为试样的相对黏度；t_0 为流出 100mL 蒸馏水的时间，s；t_1 为流出 100ml 试样的时间，s 。

5）注意事项：

a. 恩格列尔黏度计调整好水平后，应固定不动，直至全部试验完毕。

b. 试验时，如发现试样是从量瓶壁流入量瓶，应立即停止试验，并重新测定。

c. 试样每测定一次，应清洗一次黏度计的流出口。

d. 不是连续流出试样测得的流出时间，不能作为正式数据。

4.3.2.2 流动度与厚化度的测定

因为流动度是黏度的倒数，测定了泥浆和釉浆的黏度，即可得出其流动性。流动度亦可直接用恩格列尔黏度计测定流出 100mL 试样所需时间来表示。即流出的时间短，流动性好，反之亦然。为了准确地测定黏度，规定浆料流出时间的偏差为±1s。

厚化度的测定方法是将泥浆和釉浆试样放在恩格列尔黏度计内，在相同的温度和压力条件下，静置 30min 与静置 30s 流出 100mL 所需的时间之比来表示。比值愈大，说明泥浆或釉浆静止后重新凝聚而稠化的现象愈严重。

因此，测定泥浆和釉浆的厚化度，使用的仪器和器具、试样的制备、试验步骤、注意事项等均与恩格列尔黏度计测定相对黏度相同。在静置 30min 的时间里，一定要将内层容器用盖或湿布盖好，并保持外层容器的温度恒定。厚化度的计算公式见式（4.3-28）。

$$\mu = \frac{t_2}{t_1} \tag{4.3-28}$$

式中：μ 为试样的厚化度；t_1 为试样静置 30s 流出 100mL 的时间，s；t_2 为试样静置 30min 流出 100mL 的时间，s。

4.3.3 电解质试验

在泥浆和釉浆中加入一定的电解质，其黏度、流动度、厚化度就会发生变化。测定加入不同种类与用量的电解质，使浆料变得黏度低、流动性能好、厚化度低、稳定性能高的试验，称为电解质试验。

实践证明，电解质对泥浆和釉浆流动性的影响是很大的，即在含水量较少的浆料内加入适当的电解质后，也能得到与含水量较多时一样或更大的流动度，并能改善泥浆、釉浆的各项性能。泥浆和釉浆是介于溶胶——悬浮液——粗分散体系之间的一种特殊分散体系。坯料和釉料中的黏土粒子一般带负电荷，在水中能吸附正离子形成胶团。在黏土的胶团结构中，吸附层与扩散层的界面上由于有电位差而产生电动电位。扩散层厚度愈厚，电动电位愈大，浆料的流动性愈好，即黏度愈小。如果加入电解质，而这种电解质的阳离子离解程度大，且比阳离子所带的水膜要厚，其效果就更好。如水玻璃（Na_2SiO_3），一价金属钠离子易离解，Na^+ 带有 66 个水分子的水膜，因黏土粒子的吸附，Na^+ 进入黏土胶团的扩散层，使扩散层加厚，电动电位增大，黏土粒子易于移动，增加了浆料的流动性，即电解质帮助了浆料的稀释。

浆料的最大稀释度（即最低黏度）应和电动电位的最大值相适应，若加入电解质过量，胶团外的 Na^+ 浓度过高，则扩散层反而会被压缩而减小，使电动电位下降，黏土粒子不易移动，浆料黏度增加。所以，加入电解质应有一定的量。坯料和釉料中使用的黏土类型及用量不同，加入电解质的最佳量也不同。一般电解质的稀释能力随着所含离子不同而不同，各种离子的稀释能力顺序如下：$Na^+ > K^+ > NH^{4+} > Mg^{2+} > H^+ > Ca^{2+} > Al^{3+} > Fe^{3+}$ 。

由于各种电解质的工业价值不同，最常用的有 Na_2CO_3 和 Na_2SiO_3（水玻璃），或二者合用。此外还有腐植酸钠、羧甲基纤维素等。选用水玻璃作为电解质，其系数（SiO_2 与 Na_2O 分子数之比）应在 2 以上。

（1）仪器和器具。所用仪器和器具除与黏度、流动度和厚化度试验的相同外，还要另加 100mL 的滴定管。

（2）试样和电解质溶液的制备。

1）试样制备：

a. 取球磨制备好的相当于约 2kg 干料的坯料或釉料，在 105～110℃温度下完全烘干，然后粉碎并全部通过网孔尺寸为 0.15mm 的筛，放入干燥器内备用。

b. 如果对制备好的泥浆和釉浆进行试验，则直接取样。试样量按试验需要而定，并测定水分，以便计算试样的干料量。

2）电解质溶液的制备。电解质一般应先制备成水溶液，以便加入试样中。电解质溶液的浓度一般为 2%～5%。例如，制备浓度为 5%的碳酸钠溶液的方法是：称取 5g 无水碳酸钠溶于 95g 蒸馏水中即可。

（3）试验步骤：

1）取搪瓷杯若干个，洗净烘干编号。在每个搪瓷杯中加入制备好的试样干粉 100g，用滴定管在其中一个搪瓷杯中加水。一边加水一边搅拌，直至试样成为能微微流动的浆料。准确地记下滴定管读数，即加水量。

2）用滴定管将制备好的电解质溶液分别加入其余搪瓷杯中，加入量依次为干料量的 0.1%～0.5%。

3）在上述已加入电解质溶液的各搪瓷杯中再用滴定管加水，在各杯中加入电解质溶液和水的总量应等于第一只杯（未加电解质）的加水量。

4）加完电解质溶液和水后，将搪瓷杯盖好，静置 10～12h 后，充分搅拌均匀，按测定绝对黏度或相对黏度及厚化度的方法，测定各搪瓷杯中浆料试样的黏度和厚化度。

5）对已制备好的泥浆和釉浆进行试验时，按照浆料的含水率计算出含有 100g 干料的浆料量，按此量取浆料试样若干份，分别放入洗净编号的各搪瓷杯中，其中一杯不加电解质，其余的用滴定管依次加入干料量 0.1%～0.5%的电解质溶液，充分搅拌均匀后，测定各搪瓷杯中浆料试样的黏度和厚化度。

6）通过不同加水量和不同种类电解质及其不同用量的试验，可以找出泥浆或釉浆具有一定的黏度和流动度与厚化度，满足生产工艺要求，保证产品品质的最少加水量和最佳电解质种类及其用量。

（4）计算。

1）计算方法与黏度、流动度和厚化度测定的计算方法相同。

2）每一次试验均需分别测定并计算黏度和厚化度值。

（5）注意事项：

1）注意事项与黏度、流动度和厚化度测定的注意事项相同。

2）选用的电解质不仅应能改善泥浆和釉浆的性能，而且应对坯料和釉料的其他工艺性能和瓷质性能及产品品质无任何不良的影响。

3）如果使用碳酸钠做电解质，应注意检查并防止它在空气中变质为碳酸氢钠，因为后者常常使泥浆和釉浆发生凝聚。

4.3.4 湿坯压缩指标和压缩强度的测定

湿坯压缩指标是指坯料在正常可塑状态（工作水分）下翻成一定尺寸大小的圆柱体（直径×高为 45mm×32mm）湿坯试样后，受到压缩力作用产生变形至开裂时，压力负荷与高度变形量的乘积。而湿坯压缩强度，则是开裂时试样单位面积上所承受的压应力。

湿坯压缩指标同样表示坯料的可塑性，与捷米亚禅斯基法测定可塑性指标具有同样的意义，只是各自采用的试样形状、尺寸不同，测试仪器不一样，其试验结果也不一样。同时，湿坯压缩强度与该节中的可塑度系数测定试样达到某一应变量时，所承受的压应力有同样的意义，但二者试样形状、尺寸不同，测试仪器不一样，并且湿坯压缩强度是试样应变至开裂时的压应力。

测定湿坯压缩指标和压缩强度，更接近电瓷生产中的实际情况。例如：了解了湿坯压缩强度的高低，对评价坯料挤制、成形、搬运过程中是否产生开裂变形，具有一定的意义；生产大型产品时，如果坯件在成形水分下的湿坯压缩强度太低，将容易引起挤制泥段变形和湿坯件底部开裂，并且吊装搬运也容易发生问题。

影响坯料的湿坯压缩指标和压缩强度的，主要是坯料的配方组成、使用的黏土可塑性能、结合能力以及湿坯水分。湿坯水分不同，其压缩指标和压缩强度也不同。一般情况下，湿坯水分低，其值增大。因此，在测定湿坯压缩指标和压缩强度时，应同时测定相应的含水率，而且在产品挤制和成形水分下，测定相应的湿坯压缩指标和压缩强度，更具有实际意义。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①材料试验机，最大测量量程为 5000N；②金属切筒，内径×高度＝45×32mm，其中一端的外径倒角使之锋利，内径应保持不变；③金属顶出杆，外径略小于 45mm，使之能在金属切筒中滑动，长度应大于 32mm；④游标卡尺，最小读数值为 0.05mm；⑤钢丝弓等。

（2）试样制备。

1）用小型真空练泥机挤制成直径为 45mm 的泥条，切成长 32mm 的泥段。

2）取真空练泥机挤出的泥段，切取厚约 40mm 的泥块。用浸过火油再拧干的布，将金属切筒内外表面擦净，插入泥块中。用钢丝弓从泥块中切出金属切筒，并切去两端面的泥料，然后用金属顶杆将试样从切筒中顶出。

上述两种制备试样的方法可任选一种，但最好是采用第一种。试样的两端面必须切平，而且相互平行，并垂直于中心轴线。试样表面应光滑，不变形无裂纹，共制备 10 个试样，放在玻璃板上，用湿布盖好，或放入能封闭的容器中。

（3）试验步骤：

1）将制备好的圆柱体试样放在材料试验机的上、下平压板之间，按试验机的操作规程，以 2～3N/s 的加压速度对试样施加压力。

2）密切注视着试样的压缩变形，一旦出现裂纹，立即停机并读出刻度盘上的指示值。

3）测量上、下平压板之间的距离，即试样压缩后的高度，重复以上操作，将 10 个试样全部测定完毕。

4）按烘干称量法测定试样的水分。

（4）计算。

1）湿坯压缩指标计算见式（4.3-29），压缩强度计算见式（4.3-30）。

$$P = F(h_0 - h) \tag{4.3-29}$$

式中：P 为湿坯压缩指标；F 为试样起始开裂时的压力负荷，N；h_0 为试样的原始高度，3.2cm；h 为试样压缩后的高度，cm。

$$R_F = \frac{4F}{\pi D^2} \tag{4.3-30}$$

式中：R_F 为湿坯压缩强度，N/mm^2；F 为试样起始开裂时的压力负荷，N；D 为试样原始直径，40mm。

2）在表示湿坯压缩指标和压缩强度时，必须同时注明相应的湿坯水分。

（5）注意事项：

1）试样从泥段中截取，从金属切筒中脱出时应轻拿轻放，不得使其变形和印有手指纹。

2）试样在加压变形过程中，一定要注意观察各个方向的斜叉裂纹。

4.3.5 干燥失量、收缩、速率及临界水分的测定

在塑性状态下的坯料（湿坯）中，水以薄膜层包围坯料中的颗粒，并充满了颗粒之间的孔隙。干燥时，水分不断扩散蒸发，坯体的质量减少，包围颗粒的水膜逐渐减薄，同时颗粒与颗粒逐渐靠拢，体积收缩。当干燥到坯体中颗粒全部靠拢相接时，体积不再收缩，但颗粒与颗粒的孔隙间还充满着水，此时坯体的含水率即坯料的临界水分。继续干燥，空隙中的水开始排出，直至水分全部排出，坯体中就形成了孔隙。在干燥（即 110℃温度下）过程中，能排出的全部水分称为自由水，或称为机械结合水。

干燥失量、收缩、速率及临界水分的测定，是将正常可塑状态（工作水分）下的湿坯试样，在恒定的温度（65℃±2℃）和湿度（相对湿度 70%±5%）下进行干燥，定时（每隔 15min）称量和测量收缩量，计算每次称量和测量的试样失量百分率和线收缩百分率，并计算单位时间试样水分蒸发百分率，以及试样停止收缩时的含水率（颗粒之间孔隙中的水分）即临界水分，绘制出干燥失量、线收缩、速率与时间的曲线。

湿坯的干燥失量、收缩、速率及临界水分决定于坯料自身的特性，特别是与配方中使用的黏土原料的这些特性有着直接的关系。坯料中可塑性黏土用量多、颗粒细、颗粒水化水膜厚、自由水分高，则干燥失量和收缩大、干燥速率慢、临界水分低，在生产中，这种坯料制成的坯件不但干燥速度慢，而且容易产生变形和开裂。

因此，测定坯料的干燥失量、收缩、速率及临界水分，绘制出曲线，是制订坯件干燥制度的重要依据。而且为了了解黏土原料的干燥性能及其对坯料的影响，同样也应测定黏土的干燥失量、收缩、速率及临界水分。

（1）仪器和器具。试验装置示意图见图 4.3-46。其中主要包括：①调温调湿干燥箱；②天平，分度值 0.01g；③百分表（分度值 0.01mm）及测量架；④游标卡尺，最小读数 0.02mm；⑤温湿度计、时钟；⑥玻璃板或盖玻片，30×30×

1.5mm；⑦吊篮等。

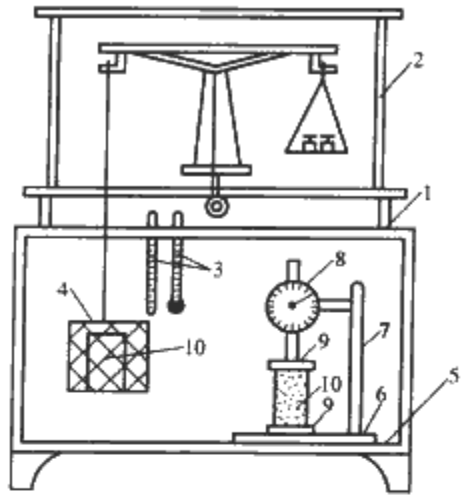


图 4.3-46 干燥失量、收缩、速率、临界水分试验装置示电图

1—烘箱；2—天平；3—温湿度计；4—网篮；5—烘箱阁板；6—玻璃板；7—测量架；8—百分表；9—盖玻片；10—试样

（2）试样制备。

1）塑性坯料（泥料）。直接取经真空练泥机挤制出的泥段，用钢丝弓切成 30mm×30mm×60mm 的试样 2 块，用湿布盖好备用。

2）干坯料或黏土取干燥的泥料或黏土约 0.5kg，粉碎至全部通过网孔尺寸为 0.15mm 的筛，加水拌和至正常可塑状态，并充分揉练均匀后陈腐 24h，再仔细地捏练排除空气。然后再揉打切成 30mm×30mm×60mm 的试样 2 块，用湿布盖好备用。

（3）试验步骤：

1）调整好装在烘箱上的天平的水平和零点，接通烘箱电源，使烘箱内的温度和湿度达到试验要求，即温度为 65℃±2℃，相对湿度为 70%±5%。

2）取已经制备好的试样一块，上下两端垫上已测量厚度的薄玻璃板（或盖玻片）各一块。用卡尺量取试样连同玻璃板的长度，获得湿试样的原始准确长度，然后把试样连同玻璃板放在测量架的百分表下，调整百分表，使之指示一定的预定值（其预定值应大于试样长度可能收缩的最大值），并随即放入烘箱中，调整好水平。

3）把已经制备好的另一块试样迅速放入天平左端悬吊在烘箱内的网篮中，并立即称量。为了保证称量迅速，可先用其他的天平预称一下。关好烘箱门，迅速调整好烘箱内的温度和湿度，并打开鼓风机，立即开始记时。

4）从试验开始，每隔 15min 称量一次（称量时应关掉鼓风机），并同时读出百分表读数和干湿球温度，直至收缩停止，即百分表先后 2 次读数相等或相差≤0.01mm。继续每隔 15min 称量一次，直至试样恒量为止（即前后两次称量相等）。

为了缩短试验时间，当试样停止收缩后，再继续称量几次，然后将称量测定水分含量的试样移至高温烘箱，在 105～110℃下烘干至恒量。

（4）计算与绘图。

1）计算。

a. 试样的干燥失量百分率可以用干基或湿基计算，分别见式（4.3-31）和式（4.3-32）。

$$W_g = \frac{m_0 - m_n}{m} \times 100 \qquad (4.3\text{-}31)$$

$$W_s = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100 \qquad (4.3\text{-}32)$$

式中：W_g 为试样干基失量率，%；W_s 为试样湿基失量率，%；m_0 为湿试样的量，g；m_n 为每次称量的试样量，g；m 为干试样的量，g。

b. 试样的干燥线收缩率可以用干基或湿基计算，分别见式（4.3-33）和式（4.3-34）。

$$H_g = \frac{L_0 - L_n}{l_1} \times 100 \qquad (4.3\text{-}33)$$

$$H_s = \frac{L_0 - L_n}{l_2} \times 100 \qquad (4.3\text{-}34)$$

式中：H_g 为试样干基线收缩率，%；H_s 为试样湿基线收缩率，%；l_1 为干试样长度，mm；l_2 为湿试样长度，mm；L_0 为试验开始时百分表上的预定值，mm；L_n 为每次读数时，百分表上实际指示值，mm。

c. 试样的干燥速率计算见式（4.3-35）。

$$\omega_n = \frac{\text{前后两次失量百分率之差(\%)}}{\text{前后两次时间之差(h)}} \qquad (4.3\text{-}35)$$

式中：ω_n 为试样的干燥速率。

d. 干燥临界水分（%）为试样干燥终了的失量百分率（即原始湿试样的含水率）与停止收缩时的失量百分率之差，一般以干基表示。

2）绘图。

a. 以试样的干燥时间，即每次称量和读百分表的时间为横坐标，相应的失量和线收缩百分率（一般都以干基，也可以用湿基，但都应相应地注明）为纵坐标，绘制干燥失量—时间曲线和干燥收缩—时间曲线。

b. 以试样干燥的平均时间，即前后 2 次称量累计时间的平均值为横坐标，相应的干燥速率为纵坐标，绘制干燥速率—时间曲线。

c. 在绘制的干燥曲线上，应标明临界水分值。示例：干燥速率和相应干燥平均时间的计算第 1 次称量的时间为 0.25h（15min），失量为 0.6%，则干燥速率为（0.6－0）÷(0.25－0)=2.4(%/h)，平均时间为(0.25)÷2=0.125(h)。第 2 次称量累计时间为 0.5h(30min)，失量为 1.38%，则干燥速率为(1.38－0.6）÷（0.5－0.25）=3.12（%/h），平均时间为(0.25+0.5）÷2=0.375（h)。以此类推。

（5）注意事项：

1）直接采用真空练泥机挤制的泥段切取试样时，切取后不允许再用外力整形，两端面应尽量切得平行，并注意在泥段上留取的位置。切取时操作应迅速熟练，尽量使水分不被蒸发。测试过程中称量亦应快速准确。

2）百分表与试样应保持在一垂直线上，并且不能使试样受力（或基本不受力）。应保证百分表的中轴上下自由、灵敏，指示值准确。

3）在整个测试过程中，应经常注意调整温度、相对湿度，使之符合要求。应尽量不开启烘箱门，在操作过程中要避免波动。

4）在无百分表和测量架时测定试样的线收缩，可以将试样平放在一块玻璃板上，用游标卡尺（或工字形刻线工具），打上一个长 50mm 的记号，将试样连同玻璃板放入烘箱内并靠近测定失量试样附近。每次测量失量称量时，取出

测定收缩试样，用游标卡尺测量记号的长度，按干燥线收缩率计算公式计算试样的收缩率。但此方法测量误差较大，且每次开启烘箱取出试样测量收缩，将影响烘箱内温度和湿度的稳定。

4.3.6 干燥灵敏性指数测定

在自然风干的条件下，正常可塑状态（工作水分）的黏土或湿坯试样的干燥体积收缩率与孔隙率的比值，称为干燥灵敏性指数。黏土和坯料的干燥灵敏性指数与黏土和坯料正常可塑状态所含的水分高低、干燥收缩率及颗粒大小、形状和堆积密度等因素有关。测定黏土或坯料的干燥灵敏性指数的目的在于：了解黏土和坯料在干燥过程中出现裂纹（开裂）的倾向性。干燥灵敏性指数高的黏土或坯料，即使采用慢速干燥，也容易出现开裂；反之，干燥灵敏性指数小的黏土或坯料，则干燥时不容易开裂。

根据干燥灵敏性指数的大小，可把黏土分为3种类型：① 低干燥灵敏性，灵敏性指数小于1；② 中等干燥灵敏性，灵敏性指数为1～2；③ 高干燥灵敏性，灵敏性指数大于2。

坯料的干燥灵敏性指数小于1，干燥过程安全，不容易开裂；坯料干燥灵敏指数大于2，即使干燥速度很慢，也容易引起开裂。坯料中使用高干燥灵敏性黏土，且用量大时，将增大坯料的干燥灵敏性指数。需要说明的是：干燥灵敏性指数只是坯料的干燥特性之一，虽然干燥灵敏性指数大，容易引起坯件开裂，但坯件在干燥过程中是否开裂，还与其他很多因素有关。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①天平，分度值0.01g或0.001g；②抽真空装置，见图4.3-24；③碾棒，见图4.3-47；④切试样工具、搪瓷盘、调泥刀、玻璃板；⑤丝绸布、纱布等。

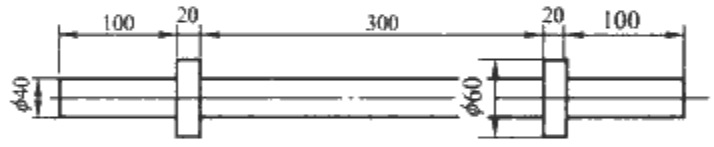


图4.3-47 碾棒

（2）试样制备。

1）黏土。称取破碎缩分后，并粉碎至全部通过网孔尺寸为0.15mm筛的平均试样200g，放入搪瓷盘，徐徐加水拌和成可塑状态（正常操作水分），并充分揉练排除空气，尽量使之达到致密，用塑料布包好陈腐24h后备用。

2）坯料。直接取经真空练泥机挤制的泥料。若是坯料干粉，则与黏土制样过程相同。

（3）试验步骤：

1）取制备好的试样放在铺有湿绸布的玻璃板上，上面再盖上一层湿绸布，用碾棒轻缓而有规律地进行碾滚。每碾滚2～3次更换碾压方向一次，使各方向受力均匀，最后用调泥刀将泥块表面轻轻刮平，然后用切试样工具将试样切成50mm×50mm×20mm或25mm×25mm×10mm的方形试块，总计制成不少于5块。将切好的试块置于垫有薄纸的玻璃板上压平，编号，并用湿布盖好，以免水分蒸发。

2）把制备好的试块当即用天平迅速称量，随后放入火油中10min饱吸火油，称取在火油中的量。取出后，用浸过火油拧干的纱布抹去试样表面的火油，称其饱吸火油后在空气中的量。然后放在垫有薄纸的玻璃板上，在温度和湿度变化不大的条件下阴干。要注意翻动，防止变形开裂，并记录每天的温度和湿度。3天后开始称量，以后每隔一天称量一次，至前后两次称量相等或相差<0.01g为止。

3）把恒量后的试样放入抽真空装置中，在相对真空度不低于97%的条件下抽真空0.5h，然后加入火油至高出试块5cm，再抽真空1h（或直接将恒量后的试样放在火油中浸泡24h）。从抽真空装置中取出试块放入火油中，称取试块在火油中的量，再从火油中取出，用浸过火油拧干的纱布抹去试样表面的火油，称取试块饱吸火油后在空气中的量。

4）每次试验平行测定5块试样。

（4）计算。试样的干燥灵敏性指数计算见式(4.3-36)。

$$K_n = \frac{V}{V_0\left(\frac{m_0 - m_3}{V_0 - V} - 1\right)} \tag{4.3-36}$$

其中：

$$V_0 = \frac{m_2 - m_1}{\rho}$$

$$V = \frac{m_5 - m_4}{\rho}$$

式中：K_n为试样的干燥灵敏性指数；V_0为湿试样的体积，cm^3；V为干试样的体积，cm^3；m_0为湿试样在空气中的量，g；m_1为湿试样在火油中的量，g；m_2为湿试样饱吸火油后在空气中的量，g；m_3为干试样在空气中的量，g；m_4为干试样在火油中的量，g；m_5为干试样饱吸火油后在空气中的量，g；ρ为火油的密度，g/cm^3。

（5）注意事项：

1）黏土或干坯粉料制备试样加水后应充分揉练，排除全部空气，达到均匀致密。

2）碾滚制作试块时，应尽量做到受力均匀一致。

3）试块应放在垫有薄纸的光滑玻璃板上，以便试样干燥收缩，干燥过程中应注意翻动试块，以防止变形开裂。

4）试样处理最好用抽真空法，无条件使用抽真空法时才使用浸泡法。

4.3.7 干燥强度和吸湿强度测定

坯料的干燥强度，是用一定直径（20mm左右）的试条在105～110℃温度下充分干燥后，测定它的弯曲强度来表示。吸湿强度则是将充分干燥后的试条再放在一定的空气湿度下，使之充分吸湿后，测定它吸湿后的弯曲强度来表示。

坯料应具有一定的干燥强度，以保证坯件从干燥到烧成的各工序之间搬运、上釉、装窑等工艺过程中具有足够的强度，特别是大型产品的坯件，其干坯强度一定要高，以避免损坏。由于干坯吸湿后的强度大幅度地降低，往往达到50%以上，所以相应地测定吸湿强度，可估计存放在空气中的干坯实际强度，更具有实际意义。

坯料的干燥强度取决于坯料配方所用黏土的结合能力、干燥强度，以及黏土的用量，同时与坯料的颗粒形状、颗粒组成、堆积密度也有一定的关系。若要提高坯料的干燥强度，就需要使用结合力高和干燥强度高的高可塑性黏土。坯料合理的颗粒形状和颗粒组成，高的堆积密度，低的干燥孔隙率，以及良好的真空挤制工艺，也能提高坯料的干燥强度。

坯料的吸湿强度与干燥强度有直接的关系（即干燥强度高，吸湿强度一般也高），同时与坯料的吸湿性能和吸湿水分的高低也有一定的关系，吸湿性能强，吸湿水分高，吸湿强度就低。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①小型真空练泥机；②烘箱，干燥器两只（一只装干燥剂，一只盛有水）；③小型弯曲试验机，最大测量量程5kN；④游标卡尺，最小

读数 0.05mm。

（2）试样制备。取正常工作水分下的坯泥，在小型真空练泥机上挤制成试条，试条的尺寸应满足干燥后的直径约 20mm，长 130mm。将挤制出的试条，放在铺有薄纸的平板上，阴干发白后，入烘箱中，在 105～110℃温度下充分烘干至恒量。将烘干至恒量的试条取出后放在装有干燥剂的干燥器中，冷却到室温，作测定干燥强度用；将烘干至恒量的试条从烘箱取出放在空气中冷却，然后放入盛有水的干燥器中，作测定吸湿强度用。试样应高出水面 5cm，经 72h 充分吸湿后，测定吸湿强度。

制备测定干燥强度和吸湿强度的试样，各不得少于 10 个。

（3）试验步骤：

1）干燥强度和吸湿强度的试验步骤详见黏土结合力试验中的试验步骤。

2）吸湿强度测定后，还要取样，按烘干称量法测定试样的吸湿水分。

（4）计算和结果表示。

1）试样的干燥强度和吸湿强度的计算见式（4.3-37）和表 4.3-41。

表 4.3-41　　干燥强度和吸湿强度计算表

d (mm)	$\frac{8L}{\pi d^3}$ $\times10^{-2}$	d (mm)	$\frac{8L}{\pi d^3}$ $\times10^{-2}$	d (mm)	$\frac{8L}{\pi d^3}$ $\times10^{-2}$	d (mm)	$\frac{8L}{\pi d^3}$ $\times10^{-2}$
19.00	3.713	19.90	3.231	20.80	2.830	21.70	2.492
19.05	3.683	19.95	3.207	20.85	2.809	21.75	2.475
19.10	3.655	20.00	3.183	20.90	2.789	21.80	2.458
19.15	3.626	20.05	3.159	20.95	2.769	21.85	2.441
19.20	3.598	20.10	3.136	21.00	2.750	21.90	2.424
19.25	3.570	20.15	3.113	21.05	2.730	21.95	2.408
19.30	3.542	20.20	3.089	21.10	2.711	22.00	2.392
19.35	3.515	20.25	3.067	21.15	2.692	22.05	2.375
19.40	3.488	20.30	3.044	21.20	2.673	22.10	2.359
19.45	3.461	20.35	3.022	21.25	2.654	22.15	2.343
19.50	3.434	20.40	3.000	21.30	2.635	22.20	2.327
19.55	3.408	20.45	2.978	21.35	2.617	22.25	2.312
19.60	3.382	20.50	2.956	21.40	2.598	22.30	2.296
19.65	3.356	20.55	2.934	21.45	2.580	22.35	2.281
19.70	3.331	20.60	2.913	21.50	2.562	22.40	2.266
19.75	3.306	20.65	2.892	21.55	2.544	22.45	2.251
19.80	3.281	20.70	2.871	21.60	2.527	22.50	2.236
19.85	3.256	20.75	2.850	21.65	2.509		

$$R_b = \frac{8FL}{\pi d^3} \tag{4.3-37}$$

式中：R_b 为试样的干燥强度或吸湿强度，N/mm^2；F 为试样破坏负荷，N；L 为试样两支点间跨距，100mm；d 为试样直径，mm。

2）在表示试样吸湿强度结果时，应注明试样的吸湿水分。

（5）注意事项：

1）测定干燥强度和吸湿强度的试样不应有弯曲变形或其他缺陷。

2）试样干燥温度和吸湿的时间，应严格按试样制备中的要求进行。

3）试样干燥至恒量后，应从烘箱中取出放在干燥器中冷却，不得放在烘箱中冷却后测定干燥强度；在干燥器中冷却到室温后，应立即进行干燥强度测定；测定时，应从干燥器中取出一根试验一根，不得一次全部取出后才逐个试验。否则，因试样可能吸湿，影响试验结果的准确性。

4）其他注意事项参见黏土结合力试验的注意事项。

4.3.8　线收缩率和体积收缩率及孔隙率的测定

可塑状态的坯料（或黏土）在干燥过程中，由于机械水脱出，其颗粒相互靠拢，体积产生收缩，颗粒之间的间隙水失去后，形成孔隙。在烧成过程中，一系列的物理化学变化，如：物质的分解和化合、颗粒进一步靠拢、玻璃相和新的晶相生成、孔隙被填充、缩小、进而大量减少等，也使体积产生缩小。

线收缩率：可塑状态的坯料（或黏土）制成的坯体，在干燥过程中，其直线方向产生的收缩量与原始湿坯直线长度之比，称为干燥线收缩率；在烧成过程中，其直线方向产生的收缩量与干坯直线长度之比，称为烧成线收缩率；在干燥和烧成过程中，其直线方向上产生的总收缩量与原始湿坯直线长度之比，称为总线收缩率。

体积收缩率：可塑性坯料（或黏土）制成的坯体，在干燥过程中产生的体积收缩量与原始湿坯体积之比，称为干燥体积收缩率；在烧成过程中产生的体积收缩量与原始干坯体积之比，称为烧成体积收缩率；在干燥和烧成过程中产生的总体积收缩量与原湿坯体积之比，称为总体积收缩率。

孔隙率：可塑性坯料（或黏土）制成的坯体，在干燥过程中形成的孔隙体积与干坯体积之比，称为干燥孔隙率；坯体烧成后还存在的孔隙体积与其体积之比，称为烧成孔隙率。

线收缩率的测定，一般采用游标卡尺（或测量显微镜）测量试样直线收缩量和原始直线长度。体积收缩率的测定，是将试样真空处理后在液体中称量，测定试样收缩前后的体积而得到体积收缩量。而孔隙率的测定，一般是在试样真空处理后使之饱吸液体，分别在液体中称量和在空气中称量，获得试样的体积和孔隙的体积，然后分别计算求出。

坯料干燥和烧成的线、体收缩率及孔隙率，都与坯料的配方组成和性质、颗粒组成、堆积密度、湿坯成形水分和结构致密度，以及烧成温度等密切相关。坯料中黏土用量高；可塑性能好，湿坯成形水分高，其干燥线、体收缩率大，孔隙率高；坯料的颗粒组成合理，堆积密度大，湿坯结构致密，则干燥线、体收缩率和孔隙率较小。坯料的烧失量大，干燥孔隙率高，其烧成线、体收缩率也就大。烧成温度适当。坯体恰好烧结成瓷，其坯料的烧成线、体收缩率为最大值，烧成孔隙率为最小值，开口孔隙率为零值。

坯料的干燥和烧成线、体收缩率大，坯体在干燥和烧成过程中容易产生变形和开裂，特别是大型坯件或长而细的坯件尤其如此。因此，以测定坯料的线、体收缩率和孔隙率来评定坯料的干燥和烧成性能的好坏，或者抽查测定正常生产的坯料的线、体收缩率及孔隙率是否发生变化来评定坯料配方和生产工艺是否稳定，都具有一定的意义。而生产中湿坯件和干坯件的放尺率与坯料的干燥和烧成线收缩率有着对应的关系。

由于坯料的性能与黏土原料的性能有着直接的关系，因此，在测定黏土原料的性能时，应同样测定其干燥和烧成线、体收缩率和孔隙率，以评价黏土的性能是否适合于坯料中使用及其用量的大小。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①小型真空练泥机；②天平，分度值 0.001g；③抽真空装置，见图 4.3-47；④烘箱、干燥器；⑤高温电炉或窑（最高工作温度不低于 1350℃）；⑥游标卡尺（最小读数 0.02mm）或工具显微镜；⑦碾棒，见图 4.3-48；⑧切试样工具，刻线工具；⑨搪瓷盘，调泥刀，玻璃板；⑩丝绸布、纱布等。

（2）试样制备。

1）黏土取样破碎缩分后，粉碎至全部通过网孔尺寸为0.15mm筛的平均试样约3kg，放入搪瓷盘，徐徐加水拌和成可塑状态（正常操作水分），并充分揉练排除空气，尽量使之达到致密，用塑料布包好陈腐24h后备用。

2）坯料直接取经真空练泥机挤制的泥料。若是坯料干粉，则与粘土制样过程相同。

（3）试验步骤：

1）线收缩率测定：

a. 取制备好的试样放在铺有湿绸布的玻璃板上，上面再盖上一层湿绸布，用碾棒轻缓地碾滚。每碾滚2～3次，更换碾压方向一次，使各方面受力均匀，最后把泥块表面轻轻滚平，然后用切试样工具将试样切成50mm×50mm×10mm的方形试块5个，然后小心地将其脱出并置于垫有薄纸的玻璃板上并压平，随即用刻线工具（或游标卡尺）在试块的对角线方相互垂直地打上长50mm的2根工字形线条（或记号）并编号，见图4.3-48。或者把制备好的试样用小型真空练泥机挤制出直径约20mm的泥条，用钢丝弓切成长约70mm的试条5根，放在铺有薄纸的玻璃板上，用刻线工具（或游标卡尺），在试条的两相对面上打上长50mm的2根工字形线条（或记号），并编号。

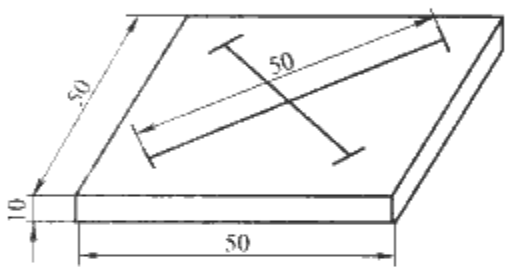


图4.3-48 方形试样及工字形线条

b. 将制备好的试块或试条在室温下阴干。阴干过程中应注意翻动，不使试块或试条因紧贴玻璃面而阻碍收缩及变形。待试块或试条发白后放入烘箱中，在温度105～110℃下烘4h，冷却后用游标卡尺或工具显微镜测量标记的长度。

c. 将测量过干燥收缩的试块或试条装入电炉（或窑），装烧时应将无记号的面作承烧面并垫上石英粉。在坯料的烧成温度下焙烧，烧成冷却后取出，再用游标卡尺或工具显微镜测量标记的长度。

2）体积收缩率和孔隙率测定：

a. 用与线收缩率测定步骤1）同样的方法，制成25×25×10mm的方形或直径20mm长25mm的圆柱形试样5个，立即用天平称量。然后放在火油中浸泡10min，称取在火油中的量，再取出，用浸过火油拧干的纱布抹去试样表面的火油，称取饱吸火油后在空气中的量。

b. 将试样放在室温下阴干，待发白后放入烘箱，在105～110℃温度下烘干至恒量（约4h）。冷却后称取在空气中的量。

c. 把在空气中称量后的试样放入抽真空装置中，在相对真空度不低于97%的条件下抽真空0.5h，然后注入火油（火油应浸没试样）再抽真空1h（若无抽真空装置，在火油中浸泡24h也可），取出后放入火油中，称取试样在火油中的量。再从火油中取出，用浸过火油拧干的纱布抹去试样表面的火油，称取试样饱吸火油后在空气中的量。

d. 将测定过干燥体收缩和孔隙率的试样放入烘箱内，在105～110℃温度下排除火油，直至试样中的火油全部排完，再把试样装入电炉（或窑）中，装烧面应垫上石英粉，在坯料的烧成温度下焙烧，烧成冷却后取出，刷干净试样上粘的石英粉及灰尘。

e. 按瓷质体积密度和吸水率测定的试验步骤，称取烧后试样在空气中的量，经抽真空（或煮沸）法处理后，再称取试样饱吸水后在水中的量和在空气中的量。

（4）计算。

1）试样的干燥、烧成和总的线收缩率计算分别见式(4.3-38)～式（4.3-40）。

$$\text{干燥线收缩率}\ (\%)=\frac{l_0-l_1}{l_0}\times 100 \qquad (4.3\text{-}38)$$

$$\text{烧成线收缩率}\ (\%)=\frac{l_1-l_2}{l_1}\times 100 \qquad (4.3\text{-}39)$$

$$\text{总线收缩率}\ (\%)=\frac{l_0-l_2}{l_0}\times 100 \qquad (4.3\text{-}40)$$

式中：l_0 为湿试样标记间的长度，50mm；l_1 为干试样标记间的长度，mm；l_2 为烧成试样标记间的长度，mm。

2）试样的干燥、烧成和总的体积收缩率计算分别见式（4.3-41）～式（4.3-43）。

$$\text{干燥体积收缩率}\ (\%)=\frac{V_0-V_1}{V_0}\times 100 \qquad (4.3\text{-}41)$$

$$\text{烧成体积收缩率}\ (\%)=\frac{V_1-V_2}{V_1}\times 100 \qquad (4.3\text{-}42)$$

$$\text{总体积收缩率}\ (\%)=\frac{V_0-V_2}{V_0}\times 100 \qquad (4.3\text{-}43)$$

其中：

$$V_0=\frac{m_2-m_1}{\rho}$$

$$V_1=\frac{m_5-m_4}{\rho}$$

$$V_2=\frac{m_8-m_7}{\rho_f}$$

式中：V_0 为湿试样体积，cm^3；V_1 为干试样体积，cm^3；V_2 为烧成试样体积，cm^3；m_1 为湿试样在火油中的重量，g；m_2 为湿试样饱吸火油后在空气中的重量，g；m_4 为干试样在火油中的重量，g；m_5 为干试样饱吸火油后在空气中的重量，g；m_7 为烧成试样在水中的重量，g；m_8 为烧成试样饱吸水后在空气中的重量，g；ρ 为火油在试验温度下的密度，g/cm^3；ρ_f 为水在试验温度下的密度，g/cm^3。

3）试样的干燥、烧成（开口）孔隙率计算分别见式(4.3-44)、式（4.3-45）。

$$\text{干燥孔隙率}\ (\%)=\frac{m_5-m_3}{m_5-m_4}\times 100 \qquad (4.3\text{-}44)$$

$$\text{烧成（开口）孔隙率}\ (\%)=\frac{m_8-m_6}{m_8-m_7}\times 100 \qquad (4.3\text{-}45)$$

式中：m_3 为干试样在空气中的量，g；m_6 为烧成试样在空气中的量，g。

（5）注意事项：

1）测定线收缩率时，试样在制作、阴干、干燥、烧成的过程中应避免变形，测量应准确。

2）试样在测定体积收缩率和孔隙率的整个试验过程中应避免棱角碰损，否则试验无效，应重做。在抹火油和称量的操作中应迅速、准确、一致。

3）其他注意事项与瓷质体积密度和吸水率的测定相同。试样的处理最好采用抽真空法。

4.3.9 烧成温度范围的测定

坯料在烧成过程中，随着温度的上升，会发生一系列的物理化学变化，如：水分的蒸发、结晶水的排出、晶型转变、体积的膨胀与收缩、有机物氧化、碳酸盐和硫酸盐分

解、长石熔融，生成液相、石英被熔触、莫来石的生成等。伴随着这些变化，坯体内的孔隙率逐渐降低，最后开口（显）孔隙率达到零，由坯变成了瓷，达到了最致密的程度。如果继续加热，瓷坯内液相增多，导致其孔隙率和收缩率由稳定转入不稳定，即内部气孔增大，并出现开口孔隙，体积密度减小。

坯料的烧成温度范围（或称玻化温度范围）是指由坯烧结成瓷的过程中，其开口孔隙率（吸水率）达到并保持为零，孔隙性试验染色溶液不渗透，体积收缩率和体积密度达到并保持在最大值或仅有微小变化时，焙烧的最低温度与最高温度区间的范围。

电瓷的烧成必须在坯料的烧成温度范围内，才能获得符合要求的显微结构和性能。坯料的烧成温度范围宽，有利于不同尺寸坯件的烧成，烧成停火温度也易掌握，不容易出现生烧或过火。一般坯料的烧成温度范围应达到 30℃以上。

坯料的烧成温度范围测定，是将坯料试样置于电炉（或窑）内进行焙烧，随着温度的升高，在不同的温度点下取出一定数量的试样，冷却后测定其孔隙率、吸水率、体积收缩率及体积密度，并进行孔隙性试验，综合起来确定坯料的烧成温度范围。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①小型真空练泥机；②烘箱、干燥器；③高温电炉或试验小窑，最高工作温度不低于 1350℃；④天平，分度值为 0.01g 和 0.001g 的各一台；⑤抽真空装置，见图 4.3-47；⑥取样钳、钢锯条、细砂纸；⑦烧杯、金属网吊篮、纱布；⑧石英粉或氧化铝粉等。

（2）试样制备。用小型真空练泥机将塑性坯料挤制成直径 12mm 或 23mm 的试条放在铺有薄纸的平板上，阴干至发白后放入烘箱内干燥，然后把试条锯成直径×长度为 12mm×30mm或 23mm×15mm 的圆柱形试样，在细砂纸上磨去毛边棱角，并沿轴向磨出一平面，以便堆放。把试样表面刷抹干净并编号，再放入烘箱内，在 105～110℃温度下烘干至恒量，取出放在干燥器内冷却至室温备用。

（3）试验步骤：

1）按测定体积收缩率和孔隙率的试验步骤称取干燥后试样的量，经抽真空（或浸泡）法处理后，再称取试样饱吸火油后在火油中的量和在空气中的量，再在烘箱中排除火油。

2）把排除火油后的试样装入电炉中温差最小的高温区（为减小温差，可以在炉膛中加一个耐火炉衬，把试样装入耐火炉衬内），在试样底部及试样之间撒一层石英粉，以免在高温时粘连。

3）试样装好后，接通电炉电源，电炉开始加热。一般按下述升温速度和预定的取样温度点取样，并做好记录。

升温速度：室温～1100℃为 150℃/h，960℃～停火为 60℃/h。

取样温度：300～900℃，每隔 100℃取样 3 只；900～1200℃，每隔 50℃取样 3 只；1200℃～停火，每隔 10～20℃取样 3 只。

4）每到取样温度点时，应保温 10min，然后在电炉内取出试样，迅速放入温度为 500～600℃的低温箱式电炉中，亦可埋在预先加热好的石英粉或氧化铝粉内，不使试样因急冷而产生炸裂。待试样冷却至接近室温后，再从石英粉或氧化铝粉中取出试样，并记好每个取样温度点的温度及相应取出的试样编号。

5）将焙烧过的试样，刷干净表面粘有的石英砂或氧化铝粉及灰尘，按体积密度、吸水率、开口孔隙率测定的步骤称取烧后试样在空气中的量，抽真空（或浸泡、煮沸法）处理。900℃前取出的试样应采用火油进行浸泡，再称取试样饱吸火油或水后，在火油或水中的量和在空气中的量。每个温度点所取的 3 只试样，均应平行进行测定。

（4）计算和试验结果。

1）计算。试样干燥后的干坯孔隙率和体积密度、烧后的开口孔隙率、吸水率、体积密度、体积收缩率计算分别见式（4.3-46）～式（4.3-51）。

$$\text{干坯孔隙率}（\%）=\frac{m_2-m_0}{m_2-m_1}\times 100 \tag{4.3-46}$$

$$\text{干坯体积密度}（\mathrm{g/cm^3}）=\frac{\rho_f m_0}{m_2-m_1} \tag{4.3-47}$$

$$\text{烧后开口孔隙率}（\%）=\frac{m_5-m_3}{m_5-m_4}\times 100 \tag{4.3-48}$$

$$\text{烧后吸水率}（\%）=\frac{m_5-m_3}{m_3}\times 100 \tag{4.3-49}$$

$$\text{烧后体积密度}（\mathrm{g/cm^3}）=\frac{\rho_f m_3}{m_5-m_4} \tag{4.3-50}$$

$$\text{烧后体积收缩率}（\%）=\frac{V_0-V}{V_0}\times 100 \tag{4.3-51}$$

其中：

$$V_0=\frac{m_2-m_1}{\rho_f}$$

$$V=\frac{m_5-m_4}{\rho_f}$$

式中：m_0 为干坯试样在空气中的重量，g；m_1 为干坯试样饱吸火油后在火油中的重量，g；m_2 为干坯试样饱吸火油后在空气中的重量，g；m_3 为各取样温度点取出的试样在空气中的重量，g；m_4 为各取样温度点取出的试样饱吸火油或水后在火油或水中的重量，g；m_5 为各取样温度点取出的试样饱吸火油或水后在空气中的重量，g；V_0 为干坯试样的体积，$\mathrm{cm^3}$；V 为各取样温度点取出的试样的体积，$\mathrm{cm^3}$；ρ_f 为试验温度下火油或水的密度，$\mathrm{g/cm^3}$。

2）试验结果。

a. 吸水率的测定。由于试样表面不可能很光滑，表面水膜不能完全被抹净等原因，导致当试样实际无开口孔隙，吸水率应为零值时，测定的试样吸水率一般将有不大于 0.05%的数值。因此，可根据试样测定的吸水率不大于 0.05%，体积收缩率和体积密度达到并保持在最大值且没有显著变化时的最低焙烧温度至最高焙烧温度来确定试样的烧成温度范围。

b. 为了使确定的烧成温度范围准确，可对这部分试样进行孔隙性试验，其结果均应不吸红。若有吸红的试样，其对应的焙烧温度点应除外，或重新进行试验。

c. 根据计算出的各温度点取出的试样测定结果，以温度为横坐标，试样的孔隙率（吸水率）、体积收缩率和体积密度为纵坐标，绘制出试样孔隙率（吸水率）—温度曲线、体积收缩率—温度曲线和体积密度—温度曲线，以表示试样随焙烧温度上升的变化情况和烧成温度范围。

（5）注意事项：

1）用小型真空练泥机挤制的试条应无孔隙、夹层、硬泥块等缺陷。

2）试条干燥后制作的试样一定要磨去棱角。在以后的整个试验过程中不允许有碰损，烧后粘附的砂粒和其他物质应小心除去。

3）每次试验应按预定的取样温度点制备好全部所需的

试样数量，并编好号。每次称量和每个温度点取出的试样编号一定要记录好，由于试样多，切勿搞错。

4）电炉炉膛装试样部位的温度差一般应不超过5℃。

5）其他注意事项与体积密度、吸水率、开口孔隙率试验相同。

6）坯料烧成温度范围的测定也可以简化进行，即不测定试样干坯时的孔隙率和体积，不测定试样从低温到高温的体积收缩率、体积密度、孔隙率的变化，而仅从1200℃开始至计划的最高温度之间各温度点取样，测定各温度点取出试样的吸水率、体积密度，并进行相应的孔隙性试验。

7）由于产品的大小和性能要求的不同，用试样在电炉中测定的坯料烧成温度范围与产品在窑内实际的烧成温度范围往往有一定的差异。因此，用试样测定的坯料烧成温度范围只能作为制订产品烧成温度时的参考。

8）本试验也适应于黏土烧结温度范围的测定。在手工制备黏土试样时，应尽可能使试样致密，均匀一致。烧结温度范围的确定，应以试样的体积密度和体积收缩率最大、孔隙率最小、且变化不大时焙烧温度的起点和终点为黏土的烧结温度范围。

4.4 釉料性能试验

瓷釉必须相互匹配才能很好地提高瓷材料的机电热性能。因此，在进行釉料配方研究及正常生产中，必须进行釉料试验及釉浆料、釉玻璃性能测定。

4.4.1 高温流动度测定

釉的高温流动度是以釉在高温下流动的长度来表示。流动度的大小主要决定于釉的高温黏度，同时也与釉在熔融状态下的表面张力、釉与瓷坯之间相互作用的性质有关。

测定釉在烧成范围内流动度的大小是鉴定釉与瓷是否适用的重要项目之一。釉的流动度过大或过小，都会使产品有缺陷，如流釉、堆釉、干釉、釉面覆盖不均匀、表面光泽不好等。

测定高温流动度有两种方法，即平板法和斜槽法。

方法一 平板法

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①筛子，网孔尺寸0.15mm、0.8mm的筛各一只；②金属模，ϕ15×10mm；③瓷板，120×30×10mm；④天平，最小分度值0.1g；⑤耐火承座，倾角20°；⑥游标卡尺，最小读数0.05mm，木槌、糊精溶液。

（2）试样制备。

1）称取已通过网孔尺寸0.15mm筛的干釉粉30g左右，加入适量的糊精溶液，经混合均匀后，过网孔尺寸0.8mm的筛，将呈颗粒状料放入带盖的容器中备用。

2）称取4.5～5.0g备用釉料倒入金属模中，捣打成ϕ15×10mm的圆柱体，烘干。若试样过高，可用砂纸将试样磨至其质量为4g时的高度，共制备试样3～5只。

3）取坯泥（试验釉用的坯泥）切成尺寸为150mm×30mm×10mm的长方形泥板，经干燥后表面磨平，在适宜的烧成温度下焙烧成瓷板，剔除其中开裂、变形、有杂质的瓷板，留光滑平整的备用。

（3）试验步骤：

1）取圆柱体釉试样置于瓷板一端的中央，将瓷板放在倾斜20°的耐火承座上，见图4.3-49，小心地将承座放入电炉或窑内焙烧，同时放入测温锥，按电瓷坯料的烧成制度焙烧。

2）测量已熔融的釉试样，其最长处A和最宽处B之和

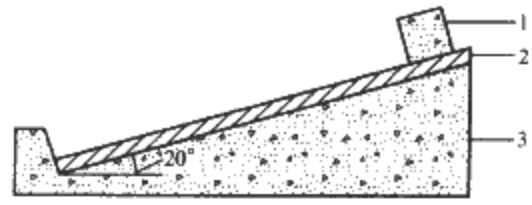


图4.3-49 高温流动度装烧图

1—试样；2—瓷板；3—倾角为20°的耐火承座

即为该釉的高温流动度，高温流动度越太，表示黏度越小，反之表示黏度越大。

（4）计算。高温流动度的计算见式（4.3-52）。

$$L = A + B \tag{4.3-52}$$

式中：L为高温流动度，mm；A为釉流动最大处长度，mm；B为釉流动最大处宽度，mm。

方法二 斜槽法

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①石膏模型；②耐火承座，倾角45°；③金属模，150mm×30mm×30mm；④槽形瓷板，见图4.3-50。

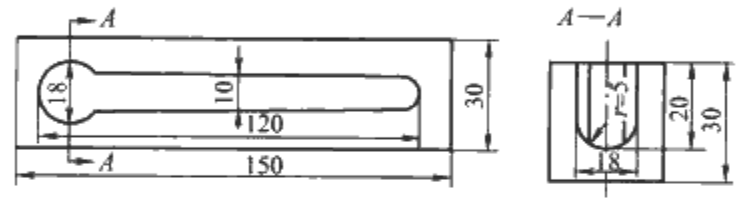


图4.3-50 槽形瓷板

（2）试样制备。

1）槽形瓷板的制备。取试验釉用的坯泥，用金属模湿压成形，然后用石膏模型在坯泥的一面印出槽及球形凹孔，脱去石膏模，成槽形毛坯，经阴干、干燥，将槽及球形凹孔用锯条刀修整后放入窑或电炉内，在适宜温度下烧成。剔除其中开裂、破损的瓷板，合格品保存备用。

2）釉样制备。见平板法的试样制备。

（3）试验步骤。斜槽法的试验步骤与平板法的试验步骤相同。

1）高温流动度装烧见图4.3-51。

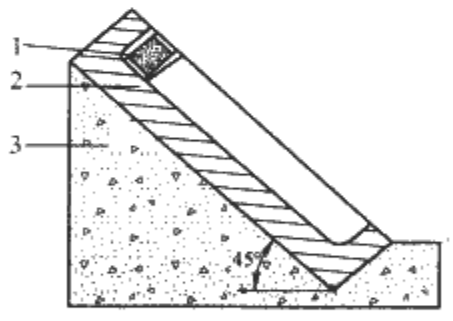


图4.3-51 高温流动度装烧

1—试样；2—瓷板；3—倾角为45°的耐火承座

2）测量已熔融釉试样的长度时，只需测定熔融后釉在瓷槽内的流动长度（不包括凹孔内的一段长度），这一长度即表示试验釉在该烧成温度范围内的高温流动度。

（4）注意事项：圆柱体装入槽形瓷板凹孔时，可稍涂同种釉浆于孔内，粘住试样，以防滑落。

4.4.2 耐火度测定

由釉粉制成截头三角锥，在一定的升温速度下测定三角锥顶部弯倒（软化变形）至耐火底座水平面时的温度，即为耐火度。从三角锥开始弯倒至最终弯倒之间的温度范围，也可称为软化温度范围。

虽然釉料的化学成分或耐火度各不相同，但当它们达到

某一恒定黏度时就会倒下，这时釉料的黏度为 10^7 泊，由此可以判断釉的高温黏度，为鉴别釉料配方是否合理及制定烧成曲线提供依据。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①高温电炉，1350℃；②墨镜；③金属模，上底边 2mm，下底边 8mm，高 30mm；④筛子，网孔尺寸 0.8mm、0.15mm 的筛各一只；⑤天平，最小分度值 0.1g；⑥砂布、玻璃板、糊精溶液。

（2）试样和耐火底座的制备。

1）釉粉过网孔尺寸 0.15mm 的筛，称取干釉粉 20g，加入适量的糊精溶液，混合均匀，造粒过网孔尺寸 0.8mm 的筛，放入带盖的容器中备用。试样的成形修整同本章 4.2.11 黏土的耐火度试样制备步骤 1）和步骤 3），制备试样 3～5 只。

2）耐火底座的成形、修整同本章 4.2.11 黏土的耐火度测定中的试样和耐火底盘的制备步骤 2）和 3）。

（3）试验步骤：

1）用耐火泥制成底座，将釉锥与标准锥分别插入耐火泥座，插入深度达 2.5～3mm，要求锥的一棱与底座垂直，如图 4.3-52 所示。

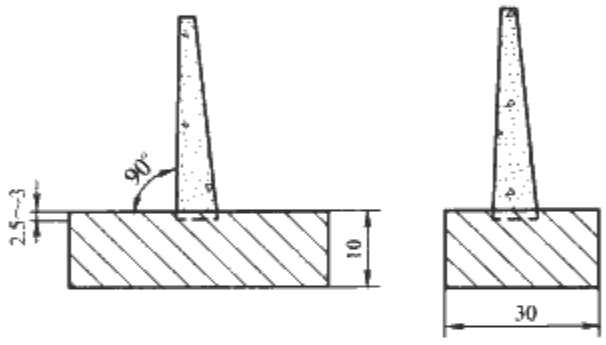


图 4.3-52 插锥部位图

2）将插好的釉锥与标准锥装入电炉中加热，升温速度：室温～1000℃为 150～200℃/h，1000℃～釉锥顶端倒至底座水平面为 2.5℃/min。

3）加热至 1000℃以后，随时注意观察釉锥、标准锥变形情况。

4）釉锥顶端弯倒至接触耐火底座水平面的温度即为该釉的耐火度。

（4）注意事项：

1）平行试验的试样不得少于 2 只。

2）釉锥尺寸形状应准确，不应弯曲变形。

3）釉锥插入的深度、角度应符合规定的要求。

4.4.3 熔融温度范围的测定

熔融温度范围是指釉在温度的作用下由开始熔融（圆柱体试样成半球状）至开始流动（试样接触角＜30°，或方格网低于 2 格）之间的温度。有些资料以三角锥开始变形的温度至最终弯倒的温度作为釉的熔融温度范围，此定义是不确切的，因为釉的熔融温度高于软化温度，软化发生在熔融之前，也就是说釉圆柱体在完全熔融之前釉锥早已弯倒。

釉的熔融温度对电瓷烧成质量至关重要，熔融温度太低，釉在坯体未烧结前覆盖在坯体上，把开口气孔完全封闭，容易引起窑后瓷件有釉泡；熔融温度太高，则坯体浸润不良，有釉面不光滑，光泽差等缺陷。

熔融温度范围的测定，是将釉料制成 ϕ3×3mm 的圆柱体试样，在高温下连续观察各温度点试样变化情况。一般用热显微镜测定熔融温度范围，也有利用 SCN 型造型材料耐火性能测定仪测定。

釉在各温度点变化的意义如下：①开始软化温度，指圆柱形试样棱角刚开始稍稍变圆；②开始熔融温度，指圆柱形试样变为半球形；③开始流动温度，指试样流展低于显微镜目镜上的方格网第 2 格，或接触角＜30°；④软化温度范围，指开始软化和开始熔融之间的温度范围；⑤熔融温度范围：指开始熔融和开始流动之间的温度范围。

热显微镜是由一个附有投影灯的显微镜和一个与显微镜处于水平位置的高温炉组成，同时带有反射装置和照相机。将装在电炉中的试样黑色侧面影像放大 5 倍，并反映在精确的格子玻璃上，然后按均匀的温度间隔摄影，摄下的图像可清楚地展示釉试样在各温度点的变化情况及熔融温度范围。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①热显微镜；②金属模，ϕ3×3mm；③筛子，网孔尺寸 0.15mm×0.8mm 的筛各 1 只；④木槌、小刀、糊精溶液、砂布、胶卷。

（2）试样制备。

1）取烘干釉粉 30g，加适量糊精溶液混合均匀，造粒过网孔尺寸 0.8mm 的筛，筛下料备用。

2）取适量的釉料装入金属模内，捣打成直径和高度均为 3mm 的圆柱体，烘干后将试样修整备用。

（3）试验步骤：

1）把制好的试样装入炉中的耐火薄板上，接通电源，按 4℃/min 的升温速度升温。

2）通过显微镜观察釉在高温阶段的变化情况，并进行照相，记录。其过程见图 4.3-53。

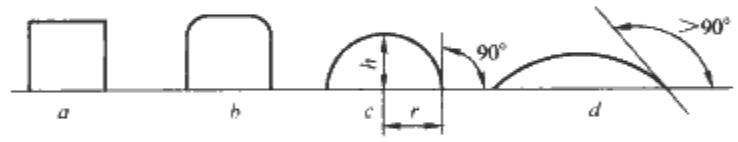


图 4.3-53 釉料烧成变化过程示意图

a—原形；*b*—开始软化（棱角变圆）；*c*—开始熔融（成半球形）；*d*—开始流动（扁平至 2 格或接触角＜30°）

（4）注意事项：

1）试样在炉中要放正，不允许倾斜。

2）用显微镜观察时，目镜网格必须对正试样，便于读数。

3）用 SCN 型造型材料耐火性能测定仪测定熔融温度时，试样制备与本法相同，试验步骤可以根据仪器的使用说明书进行。

4.4.4 接触角试验

釉与瓷坯接触点向弧形釉面引一切线，切线与瓷坯表面之间的夹角称为接触角，见图 4.3-54。瓷坯被釉湿润的程度通常用接触角的余弦 $\cos\theta$ 表示，它的大小与釉—瓷，釉—空气，瓷—空气 3 个交界处表面张力的比例有关，还与瓷坯的组成及瓷坯的性状有关。釉与瓷坯湿润的程度 $\cos\theta$ 越大，湿润就越好，当 $\theta=0$，即 $\cos\theta=1$ 时，为完全湿润，当 $\theta=180°$ 即 $\cos\theta=-1$ 时，则为完全没有湿润。因此，以接触角的测定结果可以判断釉能否很好地湿润瓷坯，得到良好的上釉表面。

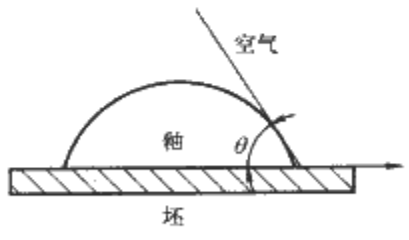


图 4.3-54 釉滴接触角

电瓷釉的接触角（θ）一般为 30°～90°。θ＞90°，表面张

力太大，浸润不好，会发生缩釉，釉面光泽不佳等缺陷；相反 $\theta<30°$时，可能发生流釉、堆釉等问题。

本方法介绍的与坯体一起烧成、冷却后的釉滴，可用照相或投影在屏幕上的方法测定接触角（θ），也可以用热显微镜或 SCN 型造型材料耐火性能测定仪连续观察、照相测定。釉滴的接触角见图 4.3-54。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①照相机；②高温炉，1350℃；③金属模，$\phi5\times5$mm；④木槌、砂纸、玻璃板、瓷片。

（2）试样制备。

1）坯料试片制备。取试验釉用坯料，经真空练泥机挤制成 $\phi30\times10$mm 的薄片，或取泥段切成 $20\times20\times10$mm 的小方块，烘干后用细砂纸磨平。在适宜的烧成温度下焙烧成瓷，选出光滑平整的瓷片备用。

2）釉样制备。取通过网孔尺寸 0.15mm 筛的干釉粉，加入适量糊精溶液混合均匀，造粒过网孔尺寸 0.8mm 的筛，称取 0.3～0.5g 的料倒入金属模中，捣打成 $\phi5\times5$mm 的试样烘干。若试样过高，可在砂纸上磨至 5mm 高备用。

（3）试验步骤：

1）将准备好的釉试样数个分别放在每个瓷片的中心，然后装入电炉中，按 2℃/min 的升温速度加热至试样棱角变圆，即开始在各温度下取出 1 个试样，放入 300～350℃的电炉中缓慢冷却、编号，并记录取出试样时的温度。

2）将各温度点取出的试样用照相机摄影，投影图用量角器准确地测量出接触角（θ）的度数。

（4）注意事项：

1）釉样应装在瓷片中心。

2）描绘投影及测量接触角时应尽量准确。

4.4.5 坯釉应力测定

釉在高温下冷却时，将从液体流动状态进入过冷状态，最后转变成坚而脆的物质。由于釉是覆盖在瓷体上的薄层玻璃态物质，它与瓷体的膨胀系数不同，因此冷却时两者的收缩不一致，导致上釉制品中产生应力。当 $\alpha_y>\alpha_c$ 时，釉的收缩比瓷大，表明瓷停止收缩时釉层仍在收缩，这时瓷体就阻止釉层收缩，使釉层受到的力为张应力。当这种力超过釉的抗张强度极限时，釉层便会开裂，降低了制品的机械强度和冷热性能；当 α_y 稍低于 α_c 时，釉层将产生有益的压应力，不仅使瓷釉结合牢固，而且提高了制品的机械强度及改善制品的冷热性能。因此在电瓷生产中，测定坯釉应力是十分有意义的。

检查坯釉间有无明显的应力，方法很多，本节主要介绍坩埚法、环法和显微镜法。

方法一 坩埚法

坩埚法是把釉粉放入坩埚中熔融（坩埚用上试验釉的同一种坯料制成），冷却后，用肉眼检查坩埚表面和釉是否有裂纹，如果没有裂纹，则表示二者之间没有明显的应力，坯釉是匹配的。如果有裂纹，甚至坩埚裂缝，则说明选择的釉料不适用于该坯料。

（1）仪器和器具。仪置和器具包括：①石膏模，内空腔状瓷坩埚，内径约 42mm，深度 22mm；②烧杯、玻捧、刮刀、玻璃板。

（2）试样制备。

1）将石膏模在 60℃下烘干，并清扫干净。

2）取制坩埚的泥浆于烧杯中，搅拌均匀，徐徐注入石膏模中，待坯体壁厚约 1～2mm 并与石膏模壁脱开，倒出泥浆后脱模，得高为 20mm，内径为 40mm 的薄壁坩埚湿坯，烘干后在 900℃温度下素烧，选无裂纹及其他破损缺陷的坩埚备用。

（3）试验步骤：称取约 6g 干釉粉倒入坩埚内（干釉粉约占坩埚高度的一半），放入窑或电炉中焙烧至釉熔融，冷却后仔细检查坯、釉有无裂纹，以判断坯、釉是否适应。

（4）注意事项：

1）平行试验的试样不得少于 3 只。

2）坩埚坯件的壁厚不得超过 2mm。

3）素烧后的坩埚应仔细检查有无裂纹，否则影响试验结果的准确性。

方法二 环法

环法又称舒尔克特—波尔的环测试法，是将外径为 50mm，壁厚为 4～6mm，高为 20mm 的圆环外表面施釉，烧成后的瓷环在其任一外表面按径向画 2 个点，然后用切片机在 2 个点的正中间锯开，读出锯开前后的变形情况来判断釉的应力。

（1）仪器和器具。仪器和器具包括：①切片机；②工具显微镜。

（2）试样制备。取上试验釉的坯泥，在真空练泥机挤制或注浆法成形圆环，圆环尺寸为外径 50mm、壁厚 4～6mm、高 20mm，干燥后，将其表面加工光滑平整，圆环外侧抹水后施上试验釉，在坯体适宜的温度下烧成。

（3）试验步骤：

1）瓷环的端面用细铅笔画 2 个标记“＋”，2 个标记之间的距离为 6.35mm。

2）用工具显微镜准确测量 2 个标记之间的距离。

3）将圆环试样置于切片机上，使切片刀口对准 2 个标记正中间位置切开。

4）将锯开后的瓷环置于工具显微镜下，准确测量 2 个标记之间的距离。如果瓷环切开前后，两点之间的距离无变化，则表示釉与坯之间无明显应力；如果两点之间的距离增大，则表示釉处在张应力状态下，用符号“－”表示；如果两点之间的距离缩小，则表示釉处在压应力状态下，用符号“＋”表示。

（4）注意事项：

1）切开试样时，要使切缝垂直于圆环端面。

2）平行试验的试样不得少于 3 个。

方法三 显微镜法

无色透明的釉处于应力状态时，也和一切双折射晶体一样，当光线通过时产生双折射，即应力双折射。据此可在显微镜下测定釉中各点的光程差 Δ，其值与试片厚度 t 及所受应力 F 有如下关系：

$$F=\frac{\Delta}{\beta t} \tag{4.3-53}$$

式中：F 为坯釉应力，0.1MPa；Δ 为光程差，mm；t 为试片厚度，mm；β 为应力系数，一般在 2.5～3.3 之间。

系数 β 被称为应力光学系数，它与试样的材料有关，一般陶瓷材料 β 取值为 3。试片为两面抛光的光片，厚 1mm 左右，用微米千分卡测量。如果光程差 Δ 已知，则 F 用式(4.3-53)计算即可得到。测定光程差可在显微镜下进行，即：使偏光镜的顶分析镜、椭圆补色器完全处于消光位置后，将待测定的试片处于 45°最亮处，旋转顶分析镜，使之再次消光，则试片中两光波的相差弧度即可按式（4.3-54）计算。

$$\delta=2\sigma \tag{4.3-54}$$

式中：δ 为弧度；σ 为分析镜旋转角度。

试片两光波的光程差则为

$$\Delta = \frac{\sigma\lambda}{180} \tag{4.3-55}$$

式中：Δ 为光程差，mm；λ 为干涉滤光片的波长，μ；σ 为分析镜旋转角度。

判断应力特性时，可插入石膏试扳，利用补色原理，就能清楚地得知是张应力或是压应力。压应力以“+”表示，张应力以“−”表示。

(1) 仪器和器具。仪器和器具包括：①切片机、磨片机、抛光机各一台；②偏光显微镜一台，带附件伟氏目镜、椭圆补色器。

(2) 试样制备要求。试样要求垂直釉面切割，厚度≤1mm，两面抛光，其制备方法同显微分析用光片制备法。

(3) 测定步骤：

1) 将目镜换上伟氏目镜，顶偏镜置于其上，移出上分析镜，精确调至消光位。

2) 插入椭圆补色器，转动测量鼓轮的旋钮，再次精确调至消光位（可用半渡片或中衬试板进行校正），从相应的刻度读取顶偏镜和补色器的消光位，全部视为“0”位。

3) 插入待测试片，精确调至消光位，并从此处向任一方向转动 45°，使之呈最亮。

4) 转动补色器鼓轮，观察其待测试片干涉色下降时的旋转方向，再次转动补色器，精确地使之回到原来的“0”位。

5) 按补色器旋钮转动使干涉色降低的方向转动顶偏镜到使试样完全消光，记下顶偏镜旋转角 σ，即可按前述公式计算光程差 Δ，再将 Δ 代入式 (4.3-53)，即可求出坯釉应力 F。

4.4.6 显微硬度测定

硬度是固体材料抵抗弹性变形、塑性变形或破坏、或其中 2 种或 3 种情况同时发生的能力。材料硬度值的大小不仅取决于材料本身，而且取决于试验方法和试验条件。其试验方法按施加负荷方法的不同，可分为静负荷试验法和动负荷试验法。静负荷试验法是在静负荷作用下把压头压入材料来测定硬度，属于这种试验法的有布氏、洛氏、表面洛氏、维氏和显微硬度试验法等；动负荷试验法是在动负荷作用下使压头冲击材料来测定硬度，属于这种试验法的有冲击布氏和肖氏硬度试验法等。

瓷釉是以天然矿物作原料烧制成的玻璃质釉，其硬度往往习惯用矿物的硬度。矿物的宏观硬度按 10 级标准的莫氏硬度计确定，但莫氏硬度计的等级极不均衡，十分粗糙。在陶瓷材料的研究中，精确测定瓷釉的硬度，通常在维氏显微硬度计上进行。由于使用的负荷小于 9.8N，故称显微硬度。

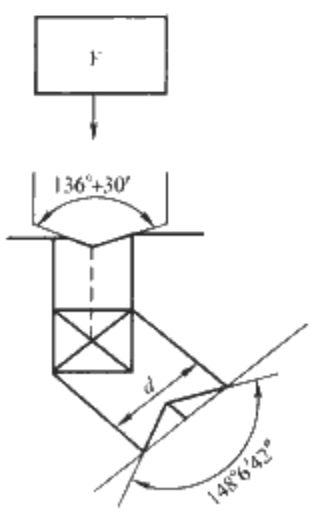


图 4.3-55 维氏硬度试验法

下面介绍维氏硬度法的原理和显微硬度计的操作方法。

维氏硬度试验法原理是：两相对面间的夹角为 136°的正四棱锥形金刚石压头在一定的负荷作用下压入试件，如图 4.3-55 所示，经规定的负荷保持时间后，卸除负荷，以所采用的负荷除以压痕的表面积所得的商数（N/mm²）来表示硬度值。

维氏硬度值用式 (4.3-56) 计算如下：

$$H_V = 1.854 \times 10^6 \frac{F}{d^2} \tag{4.3-56}$$

式中：H_V 为维氏硬度值，N/mm²；F 为所采用的负荷，N；d 为压痕两对角线长 d_1 和 d_2 的平均值，μm。

(1) 仪器和器具。仪器和器具包括：①LEITZ 显微硬度计，带维氏金刚石压头；②手压机；③橡皮泥；④载玻片。

(2) 试样制备。在施釉的试品或产品上敲取一块表面较平整且有完整瓷釉的试样，大小为 20mm×20mm 左右，试样表面光洁，无脏物。对于不洁的釉面，要用酒精擦净。试样的厚度（瓷釉的厚度）至少是压痕深度的 10 倍，见图 4.3-56。取一块载玻片，放上一小块橡皮泥。把试样放在橡皮泥上，用手压机把试样压平。

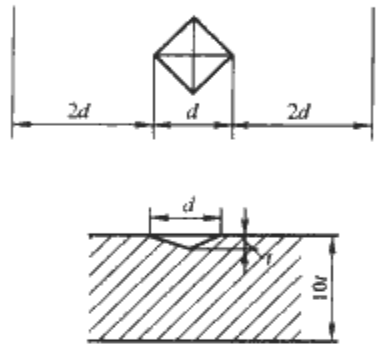


图 4.3-56 试样的厚度

(3) 试验步骤：

1) 固定物镜 50×/0.85 和压痕器，放上试样，换上测微目镜，将显微镜系统的中心进行校正。

2) 调节自动负荷传感器的水平螺钉，使其处于水平位置，接通电源，检查其工作是否正常，正常后在支架上轻轻放上选择好的砝码，调节送泵时间和负荷时间。

3) 显微镜聚焦，转下金刚石压头。

4) 按下传感器的启动开关，泵马达开始工作，达到预定负荷时，随试样被刻痕，泵自动断开，另一附加马达打开，释放压力。金刚石压头回到初始位置。

5) 移开金刚石钻头，换上 50×/0.85 物镜，在测微目镜中测量压痕对角线长度，读数方法见图 4.3-57。其中，图 (a) 为载物台移动压痕在显微目尺的“0”位；图 (b) 为调整测微目镜上的调节螺丝，使压痕上方顶角与水平线相压，余数从微分标尺上读出。图中压痕对角线长为 75+12.5=87.5μm。先测一条对角线长 d_1，然后转动测微目镜 (90°)，再测另一条对角线长 d_2。

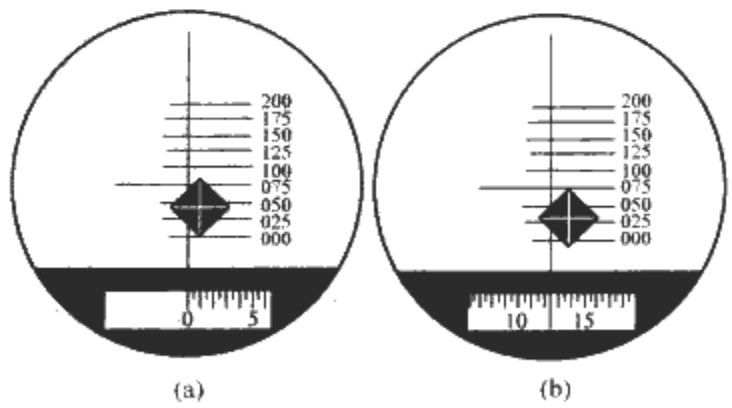


图 4.3-57 读压痕对角线长（在测微目镜中）

6) 重复步骤 3) ～步骤 5) 的操作，测量 5 个点，取平均值作为试验的最终结果。

7) 试验完华。取下试样、50×/0.85 物镜和压痕器、测

微目镜和砝码，关掉自动负荷传感器开关，一切复原。

（4）测量数据处理。

1）测量点压痕对角线长的计算。

$$d = 1/2(d_1 + d_2) \qquad (4.3\text{-}57)$$

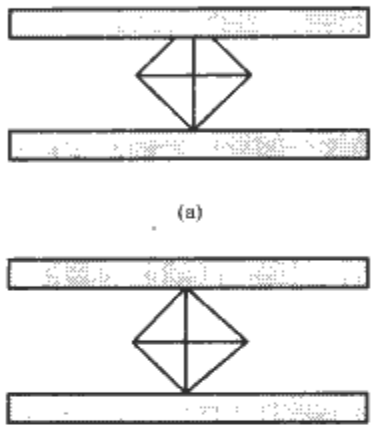
式中：d 为压痕对角线长，μm；d_1 为压痕一条对角线长，μm；d_2 为压痕另一条对角线长，μm。

2）显微硬度计算。每一个测量点的显微硬度，可根据负荷 F 和压痕对角线长 d，按式（4.3-56）和式（4.3-57）计算，也可以查“显微硬度计说明书”附表直接得到。

（5）注意事项：

1）显微镜中心必须调整好，否则，十字压痕可能会落在视场外。

2）宜用正交偏光观察压痕。



(a)

(b)

图 4.3-58 十字压痕线读法

（a）正确；（b）错误

3）读压痕对角线长时一定要压线读，见图 4.3-58，否则，所读的压痕对角线长不准。

4.5 瓷材料性能试验

制备加工好的坯料经过成型、干燥、烧成，获得结构致密、断面呈贝壳状的坚硬瓷体材料。瓷材料必须具有良好的机电热性能，才能满足电瓷绝缘子产品的技术要求。瓷材料性能试验项目一般包括 4 方面：

（1）一般物理性能试验，包括体积密度、吸水率、开口孔隙率、染料渗透性等试验。

（2）力学性能试验，包括弯曲强度、弹性模量等试验。

（3）电气性能试验，包括电气强度、相对介电常数、介电常数的温度系数、介质损耗角正切、体积电阻率、表面电阻率等试验。

（4）热性能试验，包括热震性、平均线膨胀系数、比热容、导热系数等试验。

4.5.1 染料渗透性试验（液体吸收）

染料渗透性试验是在一定的压力和时间的作用下，试验瓷材料被染料溶液渗透的程度。当瓷材料烧成良好，无开口孔隙时，染料溶液将无法渗入；若生烧或过火而有开口空隙时，染色溶液将渗入瓷体中。染色溶液渗入的深度，除与瓷材料本身的开口孔隙的大小和多少有关外，还与试验的压力和保持时间有关。染料渗透性试验目的在于说明瓷材料是否有开口气孔，可简单、直观地判断瓷的烧成情况；由于是定性分析，因此无法判定空隙率的多少，定量分析需进行体积密度、开口孔隙率的测定。

（1）试验设备。试验设备包括压力容器、高压泵和压力表，压力容器至少能耐受 30MPa 的压力。试样浸入染料溶液中，染料溶液可以直接倒入压力容器，也可以倒入一个金属容器中，再将金属容器置于压力容器中，通过液压油推动金属容器的橡胶塞或活塞传递压力，如图 4.3-59 所示。一台处理试样用烘箱，烘箱能保持 120℃±5℃的温度。

（2）试样。用碎瓷块作试样，试样上釉面积或原始烧结面❶的面积不能超过试样总面积的 25%，瓷块取自至少 3 个不同试样或部件。

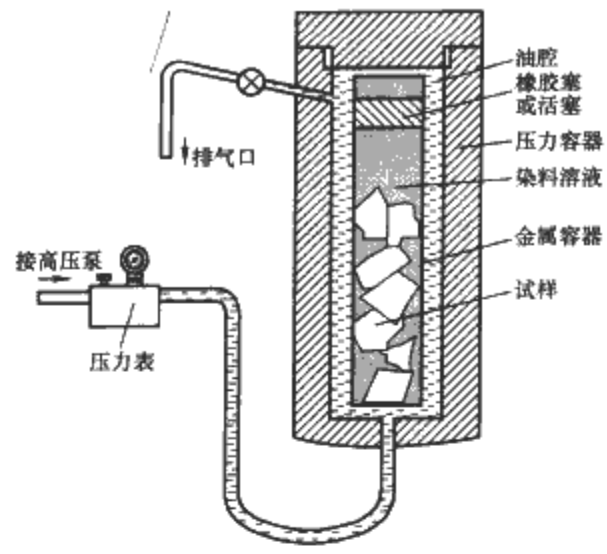


图 4.3-59 在金属容器中对染料溶液施加高压的装置

注：也可以用高压容器中的染料溶液给试样直接加压。

（3）染料。染料溶液典型浓度为 1～3g，溶剂为乙醇、工业酒精或其他合适的溶剂，其中：①较合适的无毒染料包括苍耳烷/三芳基甲烷混合物；②在使用和处理有机染料和有机溶剂时要注意对健康的损害和对环境的污染。

（4）试验方法。试样不能有油污或赃物，否则应清洗。测试前试样应在 120℃±5℃至少干燥 3h，然后破碎成适当尺寸的碎块。

将试样浸入染料溶液中，染料溶液可以直接倒入压力容器，也可以倒入一个金属容器中，金属容器用橡胶塞或活塞密封后，置入压力容器。压力容器内加压到不低于 15MPa，保压适当时间，使表压值和保压时间之乘积不小于 180，时间的单位为小时（h），表压的单位为兆帕（MPa）。保压完成后，将试样取出，用水清洗试样表面，将试样烘干后立即破碎，用肉眼观察新鲜断面，检查是否有染料渗透的痕迹。

（5）结果判断。

1）试样新断面无任何染色溶液渗透现象，俗称不吸红，表示无开口孔隙，烧成状态良好；若断面边缘或全部均匀吸红，表示有开口空隙，试样生烧。吸红的深度和范围越大生烧越严重。若实样断面边缘或全部出现网状或水草状不均匀吸红，表示有开口连通气孔，试样过火。

2）因制备试样时造成的裂纹而引起的吸红，经过观查应不作吸红看待。

（6）注意事项：

1）试验压力可以在 15MPa 及以上任选定一个值，在试验中应保持不低于此值，维持时间以次值进行计算。

2）试样烘干温度不宜过高，控制在 110℃以下即可。

4.5.2 体积密度、吸水率、开口孔隙率（显气孔）和闭口气孔率

体积密度 ρ_a 是瓷材料试样的质量 m 与包括开口和闭口孔隙体积在内的试样总体积 V 的比值。

吸水率 W_c 是瓷材料试样饱吸水后，试样饱吸的水量与试样质量的比值，以百分率表示。

开口孔隙率 p_a 是瓷材料试样中与大气相通的全部开口孔隙体积 V_1 和试样总体积的比值，以百分率表示。

闭口气孔率 p_b 是瓷材料试样中与大气不相通的全部闭口孔隙体积 V_2 和试样总体积的比值，以百分率表示。

（1）试验设备和器具。试验设备和器具，包括：

❶ 原始烧结面是指经烧结后未作任何处理的表面，一般瓷的原始烧结表面不吸水或吸水率较低。

1）液中重测量天平（能称量试样在液体中的表观质量的天平），称量精度±0.01g。

2）一根直径不超过 0.2mm 的悬挂用脱脂金属丝。

3）根据试验方法可选下列两种设备和器具之一进行测试：

① 试验方法 A 选用的设备和器具：一气密性容器（钟罩或干燥器）与合适的真空泵连接，并能用适当的方法测量密闭容器中的压力和加入液体。

② 试验方法 B 选用的设备和器具：盛有沸水的容器，装有抗腐蚀的粗筛网，在筛网上放置试样，试样高于容器底部 10mm 以上。

因为可能存在安全问题，在用可燃的有机液体时，不推荐采用方法 B）。

4）干燥试样用烘箱。

5）擦干用脱绒布。

6）新鲜蒸馏水或去离子水，或其他合适液体。

（2）试样。测量至少需 3 片瓷碎块，3 片瓷碎块的总重量应在 50g 到 80g 之间。上釉表面积或原始烧结表面积不超过总表面积的 25%。瓷碎块应清洁、无油污，在测试前用刷子刷去浮尘，去掉可能脱落的碎片。

如需对单个重量在 50g 以下的小瓷件测定密度，用下述试验方法测量的条件是：对于每件质量为 3g 以上的试样，称量的精度为±0.001g；对于每件质量为 1～3g 的试样，称量的精度为±0.000 1g。对于每件质量为 1g 以下的瓷件，下面给出的方法不适宜，此时应用几个瓷件同时测量，使测量质量大一些。瓷件的质量不能低于 0.1g。

（3）试验方法。将瓷块试样放入烘箱，并在 120℃±5℃条件下干燥 2h 以上，直至达到恒重 m_0，然后选下列两种方法之一测定开口气孔率：

方法 A

将瓷块试样装入合适的器皿中，放入真空容器并密闭容器，抽真空到 3kPa 以下，保持 5min 以上，然后将真空容器和真空泵隔离，可观察到压力稳步回升。如果在 5min 以内压力回升到 4kPa 以上，说明样品还在继续排气，此时应重新连接真空泵继续抽真空，重复这一操作，直至隔离真空容器 5min 后，其压力没有明显变化为止。在器皿中加入 23℃±2℃煮沸过的蒸馏水淹没试样，继续抽真空 5min 以上，最后，隔离真空泵放入空气，从装水的器皿中取出试样。对低气孔率的材料，可在蒸馏水中放置 6h 以上。

方法 B

将瓷块试样放入容器，用蒸馏水淹没，加热到沸点煮沸 30min 以上，继续浸在水中冷却至室温，在蒸馏水中至少放置 6h。

方法 A 和方法 B 测定开口气孔率得出的结果可能不会完全相等，通常认为方法 B 从试样中去除空气的效果较差。

无论用哪种方法处理后，利用干净的细金属悬丝将瓷块试样在水中称量得 m_w。取出试样放入蒸馏水中，将悬丝放入水中，深度与称量试样时的深度一样，称得悬丝的重量 m_s。记录水温 T，精确到 0.1℃。将试样从水中取出，用潮湿的脱绒布擦掉试样表面的水，在空气中称得重量 m_h。

（4）计算。试样的体积密度 ρ_a、开口（显）气孔率 P_a、吸水率 W_c、总气孔率 P 和闭口气孔率 P_b 的计算，分别见式(4.3-58) ～式 (4.3-62)。

$$\rho_a = \frac{m_0 \rho_w}{m_h - m_w + m_s} \tag{4.3-58}$$

$$P_a = \frac{m_h - m_0}{m_h - m_w + m_s} \times 100 \tag{4.3-59}$$

$$W_c = \frac{m_b - m_0}{m_0} \times 100 \tag{4.3-60}$$

$$P = \frac{\rho_k - \rho_a}{\rho_k} \times 100 \tag{4.3-61}$$

$$P_b = P - P_a \tag{4.3-62}$$

式中：ρ_a 为体积密度，mg/m³；P_a 为开口气孔率，体积百分数，%；m_0 为试样干重，g；m_w 为试样和悬丝水中重，g；m_s 为与称试样浸入水中相同水位的悬丝水中重，g；m_h 为试样饱吸水时在空气中的重量，g；ρ_w 为水或其他浸没液体在温度 T 时的密度，mg/m³；P 为总孔隙率，体积分数，%；P_b 为闭口气孔率，体积分数，%。

温度 T 下蒸馏水的密度列于表 4.3-33 中。如果所用液体不是蒸馏水，其密度应按 ISO 758 规定在与测定试样密度相同的温度下测定。

（5）注意事项：

1）称取试样饱吸水后在空气中的称量及抹水操作应准确迅速，以防止试样开口空隙中的水分蒸发而影响测定结果。同时，既要抹去试样表面的水，又不能带走空隙中的水，勿让试样表面过干或过湿，并尽可能保持抹干程度一致。

2）在水中称量时，试样和金属吊蓝应全部位于水中。

3）本项试验方法在测定开口孔隙率低于 0.5%的样品时，测得的开口孔隙率数值准确性较差。用染料渗透性试验更可靠。

4）本项试验方法适于测定材料的整体特性。尽管整个材料含有一些显气孔，但陶瓷部件的原始烧结表面可能不渗透。

5）除了蒸馏水以外，还可以用其他液体介质进行测试。只要在称重时的温度下，该液体密度能精确地测量到±0.001Mg/m³，如煤油、乙醇和其他低黏度有机液体。

4.5.3 弯曲强度

瓷材料的弯曲强度是试样受到弯曲力作用而破坏时单位面积上的最大应力。弯曲试验测得的断裂强度与很多因素有关，这些因素包括试样尺寸、试样横截面几何形状、表面处理、加载速率、环境湿度、夹具的几何形状和操作方法。测试结果反映瓷材料的一般强度特性和瓷材料的强度水平，但该结果不能直接用作产品设计时的强度指标。另外，测试结果可以用于质量控制检查。

（1）试验设备。测试所需要的设备如下：

1）材料试验机，能以恒定的加载速度或恒定的压头移动速度加力，能记录施加力的峰值，精度±1%。

ISO 7500—1 提供了材料试验机在张应力条件下对载荷记录线性度和分辨率的有关要求以及确定步骤，这些步骤也可以用在压力状态，弯曲强度测定就属于这种情况。

2）试样加载夹具，几何形状和尺寸满足试验要求。

3）测微尺，符合 GB/T 1216，试样尺寸测量应精确到±0.01mm。

4）测量显微镜，符合 GB/T 1214 的百分尺或其他适宜的测量设备，用于测量试样支点中心和加载压头的距离，精确到±0.05mm。

（2）测量方法及所用夹具。

方法 A 3 点弯曲及所用夹具

测试夹具或支持机构由 2 个用来支撑试样的相互平行的圆棒组成。试样平放在圆棒形支点上，加载压头在两支点中间对试样施力。2 个支点圆棒应能绕其长轴自由转动，以使摩擦力的影响降低到最小，其中一个支点应能绕着与试样长度方向正交的轴线摆动，以保证校直。加载压头的可转动方式应与支点相同，以使载荷均匀地施加在横跨于两支点上的试样上。支点圆棒、加载压头圆棒直径和两支点圆棒中心距

（跨距）应符合表 4.3-42 规定，表面应光滑，无粗磨痕。加力方向应垂直于试样平面和（或）支点圆棒所在平面，图 4.3-60 所示为典型的加载夹具组合。

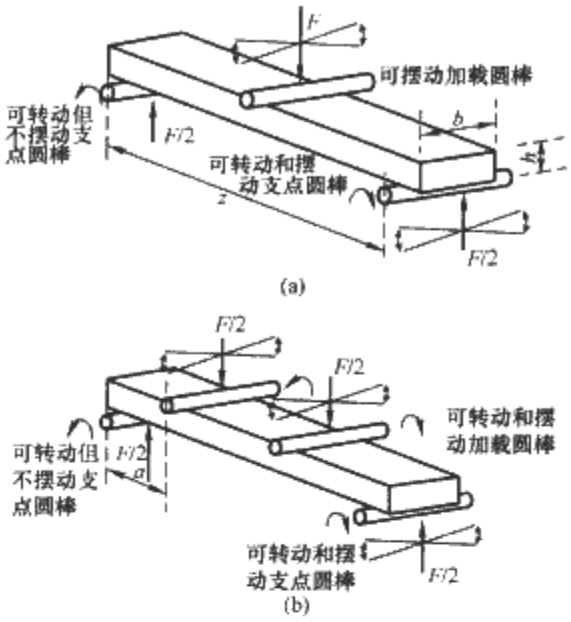


图 4.3-60 夹具

（a）3 点弯曲；（b）4 点弯曲

方法 B 4 点弯曲及所用夹具

测试夹具支持机构与方法 A 相同。2 个加载压头的中心距为跨距的一半，对称布置于两支点之间，对称度在±0.2mm以内，加力方向垂直于试样。两加载压头能绕其长轴自由转动，同时也能分别绕平行于试样长度方向的轴线摆动，以保证 2 个支点和两加载压头充分校直。

如图 4.3-61 所示的圆形截面或半圆矩形截面试样，没有必要要求支点和压头绕平行于试样长度方向轴线摆动；对于表面经加工平整和平行的试样，方法 B 中的支点和压头也不需要绕平行于试样长度方向轴线摆动，但还应让其能够绕其长轴转动。

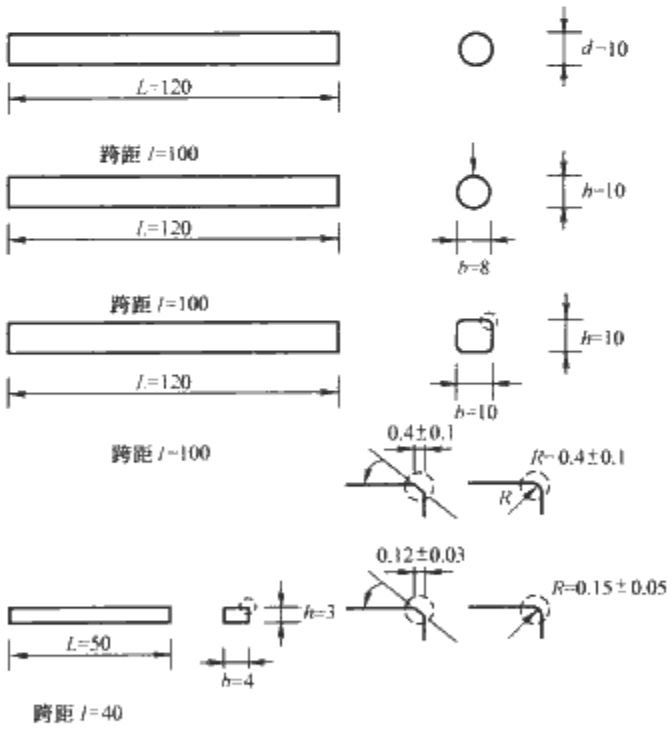


图 4.3-61 弯曲强度试样的形状、尺寸和符号

（3）试样。依据材料的分类（参考 GB/T 8411.1），试样应按表 4.3-42 和图 4.3-62 给出的尺寸制备，需要注明表面处理方式，如磨、研磨、铣等。瓷试样的制备方法应与电瓷产品制造方法相同，如等静压或挤制。

1）为适应特殊情况要求，经供需双方协议，表 4.3-42 所列出的试样和夹具尺寸可以修改，但若使用式（4.3-63）～式（4.3-68）进行计算，跨距与试样厚度之比不能小于10∶1，每次测试试样数量最少为 10 个。

2）如需要获得统计信息，如韦布尔（Weibull）模数，需要较多的试样。在这种情况下建议最少测定 30 个试样。

表 4.3-42 不同组别的陶瓷材料弯曲强度试样和试验夹具尺寸

组	亚组	试样尺寸（mm）				测量方法	夹具尺寸（mm）	
		长度 L	圆棒截面直径 d	半圆矩截面 $h\times b$	长方形截面 $h\times b$		跨距	圆棒直径
C100	C110	120	10	—	—	A	100	10
	C111	120	—	10×8	10×10	A	100	10
	C112	120	10	—	—	A	100	10
	C120	120	10	—	—	A	100	10
	C121	120	10	—	—	A	100	10
	C130	120	10	—	—	A	100	10
	C140	120	10	—	—	A	100	10

（4）试验方法。测量跨距和测量方法 B 中的压头间距应精确到 0.1mm。试样的截面尺寸应用百分尺测定，精确到 0.02mm。对于截面为圆的试样，在 3 处测量直径的最大和最小值，取算术平均值。对截面为半圆矩形和矩形的试条，至少在试条中心附近分 3 处测量试条的宽度和厚度，取算术平均值。将试样横跨在两支点上，以单压头（测量方法 A）或双压头（测量方法 B）为中心，压头相对于两支点的对称度在±0.2mm以内。如未达到要求，重新安放试验机上的夹具。以 20N/s 到 50N/s的加载速率在一个压头（测量方法 A）或等量地在 2 个压头（测量方法 B）上逐渐加载，直至试样断裂。此时记录峰值载荷，精度为 1%。加载速度可以直接选定或通过选定合适的试验机位移速率来间接地选定。重复上述测定，测完同批的每一根试样。

（5）测试的其他要求。

1）半圆矩形截面试样应在尺寸为 10mm 的方向上施压，测试的施力方向也相同。

2）长方形或正方形截面的试样应将长边倒 45°角或圆角，图 4.3-62 中标出了倒角尺寸和圆角半径。沿长度方向用磨削加工或抛光倒角。

3）测量方法 B 中，内外跨距之比应为 1∶2，跨距的偏差应在表 4.3-43 给出跨距值的±2%之内。试样截面尺寸偏差如下：

①直径偏差在±5%之内，沿长度方向的均匀程度在±2%以内。

②宽 b 或厚 h 偏差在表 3 给出值的±5%之内，试样表面应平整，平行度在±0.02mm 以内。

4）GB/T 8411.3 所给出的强度最低要求值是由测量方法 A3 点弯曲测得的值，4 点弯曲测试结果（测量方法 B）一般比 3 点弯曲测得的结果低 10%～20%。

（6）结果计算。每只试样的弯曲强度 σ_f 由式（4.3-63）～式（4.3-68）计算。

方法 A 3 点弯曲

1）圆形截面：

$$\sigma_f = \frac{8\times Fl}{\pi d^3} \tag{4.3-63}$$

2）半圆矩形截面：

$$\sigma_f = \frac{8Fl}{\pi bh^2} \tag{4.3-64}$$

3）长方形截面：

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \tag{4.3-65}$$

方法 B 4 点弯曲

1）圆形截面：

$$\sigma_f = \frac{16Fa}{\pi d^3} \tag{4.3-66}$$

2）半圆矩形截面：

$$\sigma_f = \frac{16Fa}{\pi bh^2} \tag{4.3-67}$$

3）长方形截面：

$$\sigma_f = \frac{3Fa}{bh^2} \tag{4.3-68}$$

式中：σ_f 为弯曲强度，MPa；F 为试样断裂时施加在试样上的合力，N；l 为支点间的距离（跨距），mm；a 为方法 B 中，压头到相邻支点的距离，mm；d 为圆形截面试样的直径，mm；b 为半圆矩形截面或长方形截面的宽，mm；h 为试样厚度（加载方向），mm。

（7）注意事项：

1）若试样外观和形位公差达不到要求，或折断部位不在试样中央三分之一以内，或折断面有缺陷的试样，均应剔除。

2）施加负荷的速度应严格按规定进行，并且应平稳而无冲击力。折断部位尺寸测量一定要准确，稍有误差将严重影响测定结果。

4.5.4 弹性模量

杨氏模量：产生单位拉伸或压缩单轴应变所需要的应力，通常也称为弹性模量。

静弹性模量：在等温条件下，施加静应力或准静应力所测得的杨氏模量。

动弹性模量：非准静应力条件下，即在绝热条件下测得的弹性模量，如用敲击法、共振法、声速法等。

瓷材料弹性模量的测定采用的是静弯曲测定杨氏模量的方法。对于测定剪切模量和泊松比的其他可供选择的方法还有：敲击法、共振法、声速法，这些方法经商定也可以使用，但已超出本部分范围，在本试验的报告中不能引用。另：试验用试样是按材质均匀、各向同性的线弹性材料来假定的，对于气孔率高的材料不适用本试验方法。

（1）试验设备。本试验所需的设备包括：

1）材料试验机，能以恒定的加载速度或恒定的压头移动速度对试样加力，能记录施加力的大小，精度 0.1%，分辨率优于 0.1N。

ISO 7500—1 提供了材料试验机在张应力条件下对载荷记录线性度和分辨率的有关要求以及确定步骤，这些步骤也可以用在压力状态，如在弯曲模量测定中所遇到的就是这种典型情况。

2）试验夹具，和 3 点或 4 点弯曲强度测定中所用的夹具相同。夹具的支点和压头应能自由转动和摆动，以使轴向均衡加载。这些夹具在 3 点或 4 点弯曲试验中均可采用，但如果使用应变片，则需采用 4 点弯曲试验法。

对于表面经仔细加工平行的试样，则可以不需要夹具摆动。

弯曲位移可以用下列方法 A、B 之一进行测量，也可以采用测量因弯曲引起的表面应变的方法 C 进行测量。

方法 A

用线性位移传感器在支点间测定弯曲试样上 2 个（或 3 个）参考点之间位移差的方法。4 点弯曲中，参考点指定为跨距中点和 1 个或 2 个加载点，如图 4.3-63 所示。3 点弯曲中，参考点指定为跨距中点和 1 个或 2 个支点。如果用数字表测量，应符合 GB/T 1219，精度达到 0.001mm。如用其他仪器测定，精度应达到 0.001mm，位移输出线性度应优于 0.01%，校正到 0.1%的精度。

方法 B

在给定的加载和卸载范围内，通过材料试验机表观压头位移，正确校正材料试验机柔度的方法。材料试验机柔度应当用至少 15mm 厚的钢样或陶瓷样代替试样反复测量而确定。位移记录仪器（如图表记录仪），应通过对比记录的压头位移和实际位移进行校正。实际位移用数字表进行测量，数字表应符合 GB 1219，精度达到 0.001mm，或用精度达到 0.001mm 的线性位移传感器测量，位移输出线性度应优于 0.01%，校正到 0.1%的精度。

当给试样加力时，如果材料试验机和试验夹具不合适和没有可重复的刚度，上述方法 B 不准确。所用材料试验机的柔度不能超过 0.01mm · kN^{-1}。此外，这种方法中载荷位移的轨迹不会是直线，且加卸载线也不会重合，如图 4.3-57的下半部分所示。

方法 C

在试样表面上装一个或一个以上应变片，此方法只适用于 4 点弯曲。应变片装在两加载点中点处的张应力面上（或两面都装），长度不得超过压头之间的跨距。应变片和配套的桥电路精度优于 0.1%，并具有分辨小于 10^{-5} 应变的能力。

（2）试样。优选试样的形状为薄平板，跨距与厚度之比大于 50，宽与厚度之比大于 4。

除非用应变片测量，表 4.3-42 中所给出的厚试样会出现较大的测量误差。圆截面试样的跨距与直径之比应>40，但不能用应变片法。

试样被加工成平面的长度至少比跨距长 5mm，平行面的平行度优于厚度 h 和宽度 b 的±1%，对于圆试条，则平行面的平行度优于圆棒直径 d 的±1%，长方形截面的试样不能倒边。对应变片法，试条表面应平整，两平行面平行度应在厚度的±1%之内。每种材料至少测定 3 个试样。

（3）试验方法。在几个点上测量试样的厚度 h 和宽度 b，精确到 0.01mm，取平均值。和测定强度一样，将试样依次放到试验夹具上，压头以恒定速度逐渐加载，位移速度在 0.001～0.5mm · min^{-1} 之间。按所选用的测试方法，记录位移或应变。当达到所选载荷的最大值后，试验机以与加载相同的速度卸载到零。

用不超过 $0.5\sigma_f$ 的应力 σ 和式（4.3-68），可以计算出试条不折断的许用上限载荷。

应注意考虑材料试验机在加载和卸载中都存在滞后现象。

重复加卸载循环至少 2 次以上，直到得到可重复的结果，至少以同样的方法测定 3 根试条。不管方法 A 或 B，都用一个支点作为位移测量参考点测量位移。取下试条，换上对边平行的钢质或瓷质大试条，在相同的加载范围内重复加载循环，记录测得的挠度。至少测量 3 次。

（4）结果计算。可用试样的挠度和相应的载荷按下述方法推算出弹性模量（杨氏模量），如图 4.3-62 所示。

方法 A

在所用载荷范围内，选择不低于最大载荷 10%的载荷为低点，选择不高于最大载荷 90%的载荷为高点，从记录数据中计算出两点相应的位移，检查每次加卸载位移的计算

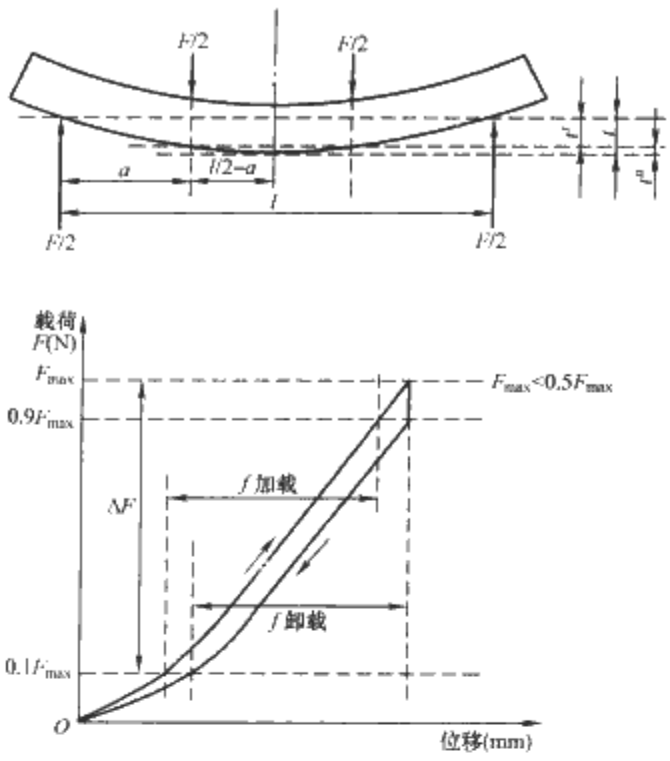


图 4.3-62 杨氏模量测定中位移参数和位移测定方法

结果，剔除与平均值相差 5%以上的位移结果后，算出平均值。

方法 B

和方法 A 类似，不同的是，用与试样测试中相同的载荷范围，进行多次加载循环，以便测定试验机/夹具的挠度，从试样所测得的挠度中减去机器的平均挠度。

方法 C

和方法 A 类似，不同的是，要测量的是应变变化。

第一次加载循环测定时，因试样适应试验夹具和夹具准直的原因，结果可能与其他次循环有很大差异，上述步骤剔除了初次加力和试验设备卸载所产生的不确定因素。

杨氏模量计算如下：

1）第 1 种情况。3 点弯曲，用方法 A 或 B 测得跨距中点相对于支点的挠度计算为

$$E=\frac{Fl^3\ 10^{-3}}{4fbh^3}\ 或\frac{4Fl^3\ 10^{-3}}{3\pi fd^4} \tag{4.3-69}$$

2）第 2 种情况。4 点弯曲，分 3 种情况计算。

用方法 A 或 B 测得跨距中点相对于支点的挠度计算为

$$E=\frac{Fa\ 10^{-3}}{4fbh^3}(3f^2-4a^2)\ 或\frac{4Fa\ 10^{-3}}{3\pi d^4}(3f^2-4a^2) \tag{4.3-70}$$

用方法 B 测得一个加载点相对于支点的挠度计算为

$$E=\frac{Fa^2\ 10^{-3}}{f'bh^3}(3l-4a)\ 或\frac{16Fa^2\ 10^{-3}}{3\pi f'd^4}(3l-4a) \tag{4.3-71}$$

用方法 A 测得跨距中点相对于一个或两个加载点的挠度计算为

$$E=\frac{3Fa\ 10^{-3}}{4f''bh^2}(l-2a)^2\ 或\ \frac{4Fa\ 10^{-3}}{\pi f''d^4}(l-2a)^2 \tag{4.3-72}$$

用方法 C 直接测量试样下端的应变计算为

$$E=\frac{3Fa\ 10^{-3}}{bh^2\varepsilon} \tag{4.3-73}$$

式中：E 为弹性模量（杨氏模量），GPa（$=10^3\ N/mm^2$）；F 为确定位移所选定的载荷高值和低值之差，N；l 为跨距，mm；a 为支点中心和相邻加载点垂直于加载方向上的距离，mm，4 点弯曲中 $a=1/4$；f 为在选定的载荷范围 F 内，试样中点的平均挠度，mm；f' 为 4 点弯曲测试中，在选定的载荷范围 F 内，沿压头移动的竖直线方向测得的支点和加载点间试样的平均挠度，mm；f'' 为 4 点弯曲测试中，沿压头移动的竖直线方向测得的跨距中点和加载点（如用两加载点，则是试样相对于两点的平均挠度）间试样的平均挠度，mm；ε 为由应变片测得的加载点间试样下平面的应变；b 为试样的宽度，mm；h 为试样的厚度，mm；d 为试样的直径，mm。

4.5.5 平均线热膨胀系数

当瓷和釉加热时，体积产生膨胀。在某一温度区域内，温度平均升高 1℃时试样单位长度的平均伸长量称为该温度区间的平均线膨胀系数。平均线膨胀系数是瓷和釉的主要性能之一，其值应在一定范围内。若瓷和釉的线膨胀系数大，其冷热性能则差。一般要求釉比瓷的平均线膨胀系数略小，以利于在烧成冷却过程中瓷给釉层产生压应力，提高上釉瓷材料的力学性能。反之，则会降低上釉瓷材料的力学性能，甚至会使釉层产生龟裂。釉的平均线膨胀系数也不能比瓷的小太多，否则会造成釉层剥落。

（1）试验设备。瓷材料的平均线热膨胀系数测定所用试验设备通常是机械式热膨胀仪，可选用合适的商业化设备，但要满足下列要求：

1）位移测量仪器的输出线性度为标称位移范围的 0.5%。

2）位移测量仪器处于温度能控制在±0.5℃的环境中。

3）在以最大 2℃/min 速率升温或降温时，试样的温度均匀性应在±5℃。

4）在 24h 内，位移测量仪器的输出应稳定在试样长度的 0.01%内，位移的分辨率至少为试样长度的 0.005%。

5）测量温度为 800℃以下时，试样槽和推杆材料为石英玻璃或高纯氧化铝瓷，对于更高的温度应使用高纯氧化铝瓷。

6）记录试样温度的热电偶的精度应高于±0.5℃。

测量仪器只有达到上述参数，才能保证线热膨胀系数的测定精度在 100℃的温度间隔内优于 $\pm0.5\times10^{-6}\ K^{-1}$。通常采用两类设备：一是单试样直接测量设备；二是差示测量设备，即测量被测试样和参考试样长度变化差。

（2）试样。试样为圆棒或方棒其长度应满足试验设备要求，也能满足温度均匀性要求，至少应准备 2 根。为了使升温和降温过程中热滞最小，应优先选用截面积在 $30mm^2$ 以下的试样。如果试样截面积大于此值，在报告中应加以说明。试样的两端形状应与设备相匹配，即加工成平头与圆头推杆相匹配，或加工成圆头与平头推杆相匹配。试样的长度应与用来校正设备的参考试样的长度相近似，或与差示方法中所用的参考比较试样的长度相近似。

（3）试验方法。在测试前，设备应用适当的方法校正，比如用标准试样校正。按规定定期、或在设备发生变化、或怀疑高温部件损坏时，对设备进行校正。

放入试样后，以升温和降温速率不超过 2℃/min 的速度，至少进行 3 次升温和降温循环，并记录表观线热膨胀。试样长度应近似于参考样的长度，热循环设定的最高温度至少应比测定线膨胀系数的温度高 20℃。

线热膨胀系数测定的温度范围为 30～300℃、30～600℃、30～1000℃，或经协商同意，选用其他任何测量范围。经协商测试温度范围可以改为与产品使用相适应的范围，从这种测试中推算出的数据不能认为符合本标准。

测试温度范围受被测材料热稳定性的限制。对大多数玻璃和玻璃—云母材料，测量温度范围一般限制在 30～300℃。如需要，线热膨胀系数可在 30～100℃内测定，在这种情况下，升温速率不能超过 1K/min，设备也应在相同速率下校正。此外，加热起始温度应低于 30℃。

(4) 结果计算。用合适的 S、δ 和 $\bar{\alpha}_{app}$ 校正值，可计算出试样要求温度范围的平均线热膨胀系数为

$$\bar{\alpha}_s = -\frac{S\Delta\chi - \delta}{L_S \Delta T} + \bar{\alpha}_{app} \tag{4.3-74}$$

式中：$\bar{\alpha}_s$ 为试样在 ΔT 温度范围内的平均线热膨胀系数，K^{-1}；L_S 为室温下试样的长度，mm；$\bar{\alpha}_{app}$ 为设备在 ΔT 温度范围内的有效平均线热膨胀系数，K^{-1}；S 为设备灵敏度，仪器输出单位，mm，V，等；$\Delta\chi$ 为测定温度范围内记录的位移，仪器输出单位，mm，V，等；δ 为测定温度范围内基线的漂移，mm；ΔT 为测定温度范围，K。

设备常数 S、δ 和 $\bar{\alpha}_{app}$ 用标准试样或其他方法校正时确定。

(5) 注意事项：

1) 石英玻璃托管支架很脆，容易损坏，放置试样时必须小心仔细。

2) 仪器周围严禁机械振动。

4.5.6 比热容

(1) 试验设备。比热容通常用专用设备使用加热物体向较低温度处传热或差式量热的方法进行测试。比热容的测量重要的是，必须用校正过的热电偶或热电阻精确地测量和显示温度，以及必须用已知比热容的参考材料对设备进行校正，通常所用的材料是 α 氧化铝，测量的总精度优于 10J/(kg·K)。

(2) 试样或试验材料。试样可以是按测试设备要求加工的试块，也可以是粒状或粉末状材料，至少测试 2 个试样。

(3) 试验方法。将试条或材料在 120℃±5℃条件下干燥至少 2h，直至恒重。称量试条或材料精确到 0.1%。测量前应对每个试条或材料进行这一操作。

由试验设备正常操作方式测定结果可以计算出试样在冷却温度范围内的平均比热容，为此，本标准规定所有材料冷却温度范围为 30～100℃。对 GB/T 8411.1 中某些在高温下使用的材料，只要相关方协商一致，最高温度可以选到 800℃。

对每个试样或试验材料必须至少进行 3 次测试。

如果在不同的上限温度下进行足够多的测试，则任何温度下试样的准确比热容均可通过曲线拟合算出。

(4) 结果计算。测试结果的计算应按测试设备要求的步骤进行，以 J/(kg·K) 为单位，精确到 10J/(kg·K)。

4.5.7 热导率

(1) 试验设备。本部分涉及的瓷材料的热导率值覆盖了从小于 1W/(m·K)到大于 150W/(m·K)的整个范围，测定热导率的设备一般都只能覆盖其中的一部分。对于热导率大约在 5W/(m·K)以下的材料，要求薄板上的温度梯度高；对于热导率大约在 50W/(m·K)以下的中等热导率的材料，通常在参考样间夹加一个短圆柱的方法（比较试样法）测量；对于高热导率的试样，需要用长圆柱试样，直接用量热法测量。可以用测量材料热扩散率的方法代替热导率的测量方法，用下式计算出某一温度下的热导率：

$$\lambda = a\rho c_p \tag{4.3-75}$$

式中：λ 为热导率，W/(m·K)；a 为热扩散率，$1/(s \cdot m^2)$；ρ 为密度，kg/m^3；c_p 为比热容，J/(kg·K)。

试验设备和试验方法的具体细节超出了本部分的范围，需要当事各方协商一致选择适当的方法。但是精度应优于 ±10%。

(2) 试样。试样应按所用特定设备的要求制备。

对各向异性的材料，如挤制材料，应当注意保证测量在一恰当的方向进行。一般要求垂直于热流的表面应当磨平，平行度在 0.05mm 以内。

(3) 试验方法。直接测量热导率时，在垂直于热流的两平行面间建立稳定均匀的温度梯度，记录两平行表面的温度，测量试样的横截面积。按加热法（如从输入的电功率计算）或冷却法（如水流量热仪）计算通过试样的热流速率。

如测量热扩散率，在薄试样的一面加热脉冲，记录脉冲到达另一面的时间。

无论用什么方法，除 C 500 类材料的测试温度范围在 30～800℃外，其他材料的热导率应是 30～100℃间的平均值。

如当事各方达成一致，测量的温度范围可以改变成适合于产品实际使用的范围，由此测量推算出的数据不应该认为符合本标准。

(4) 结果计算。结果的计算应符合所用测试方法规定的方法计算，包括用设备校正结果对测试结果的修正或其他系统误差的校正。

4.5.8 抗热震性

抗热震性能是瓷材料试样耐受急剧温度变化的能力，以加热温度和急冷温度的差值来表示。电瓷材料总的来说抗热震性能较差，但各类电瓷材料的抗热震性必须达到一定值，才能满足电瓷产品的性能要求。抗热震性能试验的目的是评定各种瓷材料在水中急冷、急热条件下的特性。在水中急冷、急热测试条件下测定的结果与在其他条件下得到的结果不同；即使材料相同，但由于试样的大小不同，其抗热震性能的结果也不相同。为了得到电瓷产品在使用条件下的抗热震特性，在热震检测中应模拟使用条件，这类检测超出了本部分的范围。

(1) 原理。将预先加热的试样放入水浴中快速冷却后，检查损伤。下面给出 2 种检查损伤的方法：

1) 在急冷后，测量试条的弯曲强度，并与未经热震的试样相比，若经急冷后试条强度下降，表明发生了热震开裂。

2) 在常压下进行染料渗透性检测，急冷后若出现明显裂纹，则表明发生了热震开裂。这种方法只能用于开口孔隙率低于 1%的材料。

(2) 试验设备。试验需要以下设备：

1) 能保证在 100mm×100mm×100mm 空间内温度均匀的烘箱，并能控制温度波动在 ±2℃内，其上限温度至少达到 1000℃。

2) 能保证在试样浸入后水温升高不会超过 1K 的水浴，水浴中的水温应在 10～20℃之间。

3) 试验方法 1) 中，强度测定设备的要求按 4.5.3 中的要求。

(3) 试样。方法 1) 和方法 2) 的试样都是圆棒，直径 10mm，长 120mm。本实验所要求的最少试样数量为 30，随机分成 5 组。

对直径为 10mm 的试样，其热震特性受试样直径精确度影响不大。试样直径越小，使试样开裂的热震次数越多。其他形状的试样，尤其是有尖锐边角的试样，经受较少次数冷

热循环就可能开裂。只要各方协商一致，也可以采用其他形状和尺寸的试样。

（4）试验方法：

1）将至少5个试样放入烘箱，加热到某一温度（对各种电瓷材料，烘箱应加热到高于水浴水温100K；当预计被测瓷材料抗热震性较好时，可以选用初始温度差高于100K。GB/T 8411.3中列出的所有类别材料的抗热震指标均可作为选用起始温差的指南）并保温30min，然后将热试样从烘箱中取出，迅速完全浸入水浴中，浸泡5min，取出后在120℃±5℃的烘箱中干燥至少2h，按测量弯曲强度的方法进行试样测试。

同样测试未经冷热处理的第2组5根试样的弯曲强度。如果热震后试样的平均强度值低于未经处理试样的三分之二，则再取第3组5根试样重复上述测试过程，但加热温度应降低50℃。

如果热震后的试样强度与未经冷热处理的相近，则将另一组5根试样加热温度升高50℃（对陶瓷和钢化玻璃试样）或20℃（对玻璃试样），重复上述测试过程。

如果以相差50℃温度间隔进行热震后的试样强度变化值大于原始强度的三分之一时，应再取试样进一步测试中间温度差时的强度变化，以确定更接近强度突变点的温差。

试样加热温度和水浴温度之差是本项试验所测的抗热震性。某些材料，特别是粗晶或高气孔率材料，在临界温差时，其强度可能没有突变，大多数随初始温度升高，强度缓慢下降。在这种情况下，选择试样热震后的强度与原始强度相比下降三分之一时的温差作为试样的抗热震性温差。

用与方法1）相同的步骤和相同的试样数量，不测定强度，而是用将热震后干燥的试样在适当的染料溶液中浸泡染色、清洗、干燥后，检查裂纹的方法代替。有色染料溶液适合于浅色试样，对黑色试样应用合适的专用紫外荧光染料。若产生裂纹，表明热震试样失效，用方法A中的步骤重复试验，以选择试样初始加热温度。

临界抗热震性定义为在一组5根试样中的任意2根试样上检测出开裂时的温度差。

对大多数低孔隙的材料，通过这种方法测定的温差与强度显著下降的温差几乎相同。

2）这种方法只能用于开口孔隙率低于1%的材料，不适合于多孔或粗晶材料。

4.5.9 电气强度

当电场强度达到某一临界值时，电瓷材料在外电场的作用下就会失去其绝缘性能，这种现象称为绝缘介质击穿。在规定的试样条件下，发生击穿时的有效电压值（峰值电压$\sqrt{2}$）与承受外施加电压的两电极间试样厚度的比值称为电气强度。试验时，在圆形试片上施加工频电压，逐渐升高电压直至击穿，试样及相应方法共有2种：

方法A：将直接烧成的或加工成的薄圆片试样放在两钢制或铜制球间，在两球上施加电压。

方法B：用一边有半圆球凹坑（压制或加工）的圆片试样，将一钢制或铜制球放入凹坑，另一面放在平板电极上，在两电极间施加电压，如图4.3-63所示。

击穿电压与材料击穿点的孔隙性有很大关系，影响电性能的孔隙和其他显微结构因素与制造方法有关。

以上2种方法的测试结果不一致，其测试结果都与制造方法有关：方法B测得的结果可能较为分散，这种分散性取决于试样成形的方法，所以应用时应优选方法A。

（1）试验设备。所用电气测试设备应满足GB/T 1408的要求，方法A的常用布置如图4.3-64所示，其他设备包括：

1）一台能在120℃±5℃保温的烘箱。

2）一个干燥器。

3）符合GB/T 1216的千分尺，方法A用平头测砧，方法B用圆头测砧。

（2）试样。至少测定10个试样。

方法A的试样为：圆片直径80mm，厚度2.5mm±0.5mm，两面平行度±0.05mm。

方法B的试样为：圆片尺寸如表4.3-43所示，圆片的一面有一半圆球形凹坑，如图4.3-63所示，凹坑的表面和相对的平面上应涂导电涂层。

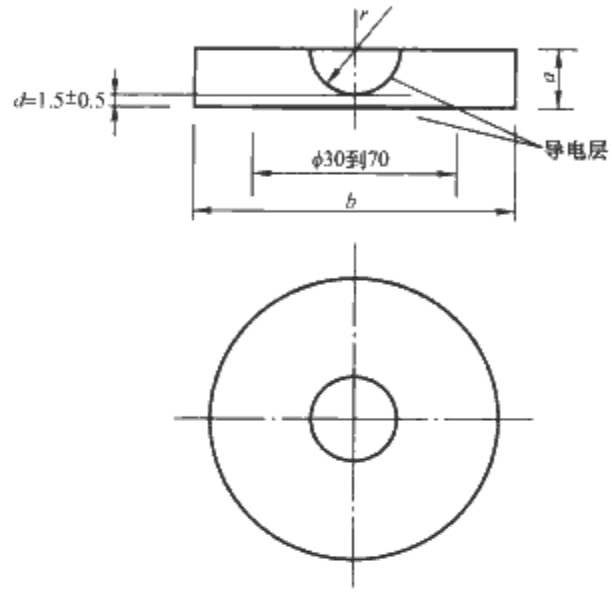


图4.3-63 电气强度和耐受电压测定（试验方法B）的试样

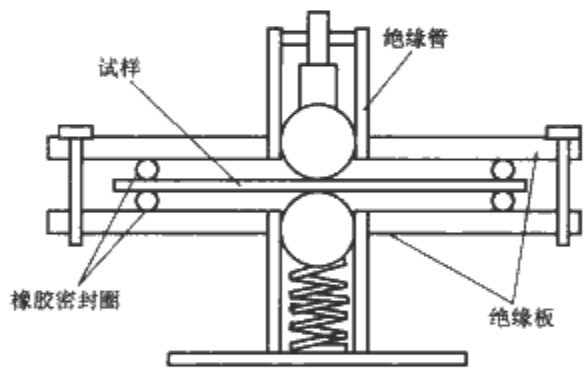


图4.3-64 电气强度测定（试验方法A）的试样及电极

表4.3-43 方法B的试样尺寸

尺 寸（mm）			球体直径（mm）
a	b	r	
3到12	50到80	$10^{+0.5}_{-0.0}$	20
3到6	25	$5^{+0.5}_{-0.0}$	10

（3）测量方法。按下述方法测量试样的厚度：在方法A中用带平头砧的千分尺在尽可能接近预计击穿点处测量试样的厚度，精确到±0.02mm；在方法B中，用带球头砧的千分尺测量球形凹坑中心处的厚度，精确到±0.02mm。

试样在120℃±5℃的烘箱中保温2h，并在干燥器中冷却。测量在15～35℃环境下进行。

将试样放在测试装置上，并浸入合适的介电介质中，介质的电阻率应足够大，以使测试能顺利完成。

为防止试样边缘放电，介质的电阻率通常为：测量陶瓷试样时，为 $10^8 \sim 10^{10}\Omega$；测量玻璃试样时，为 $10^4 \sim 10^6\Omega$。经当事各方同意，变压器油可以作为典型的使用介质。介质的电阻率可以用 IEC 60 247 描述的方法测量。

对试样快速升压至预计击穿电压的一半左右，然后以一定的速度升压，以保证试样在从加压开始算起的 10～20s 内击穿，并记录击穿电压。在测完要求的最低试样数量后，如果击穿的平均升压时间在要求的范围内，即使某些试样的击穿时间超出了范围，结果也符合要求。

(4) 结果计算。方法 A 的电气强度 E 由式 (4.3-76) 计算：

$$E = \frac{U}{d} \tag{4.3-76}$$

方法 B 的电气强度 E 由式 (4.3-77) 计算：

$$E = kU \tag{4.3-77}$$

式中：E 为电气强度，kV/mm；U 为击穿电压（有效值），kV；d 为试样厚度，mm；k 为电场不均匀校正后的试样厚度倒数值，1/mm。表 4.3-44 列出了不同厚度试样的 k 值。

表 4.3-44　　不同厚度试样的 k 值

试样厚度 d (mm)	半球半径为 r 的试样，校正后厚度的倒数值 (1/mm)		试样厚度 d (mm)	半球半径为 r 的试样，校正后厚度的倒数值 (1/mm)	
	10mm	5mm		10mm	5mm
1.35	0.809	0.879	1.51	0.730	0.801
1.36	0.803	0.874	1.52	0.726	0.797
1.37	0.798	0.868	1.53	0.722	0.792
1.38	0.793	0.863	1.54	0.717	0.788
1.39	0.787	0.858	1.55	0.713	0.784
1.40	0.782	0.853	1.56	0.709	0.780
1.41	0.777	0.848	1.57	0.705	0.776
1.42	0.772	0.843	1.58	0.701	0.772
1.43	0.767	0.838	1.59	0.697	0.768
1.44	0.762	0.833	1.60	0.693	0.764
1.45	0.758	0.828	1.61	0.689	0.760
1.46	0.753	0.823	1.62	0.685	0.756
1.47	0.748	0.819	1.63	0.681	0.752
1.48	0.744	0.814	1.64	0.678	0.749
1.49	0.739	0.810	1.65	0.674	0.745
1.50	0.735	0.805			

4.5.10　耐受电压

耐受电压试验是对一定厚度的试样施加一定的电压，测试在规定的时间内试样是否发生击穿。

本项试验是电气强度测试的替换方法。与测量短时击穿电压不同，此方法是在试样上施加一预定电压，在规定时间内试样不应失效。

(1) 试验设备。与电气强度测试用设备相同。

(2) 试样。用电气强度试验方法 B 中的试样相同，数量不少于 10 个。

(3) 试验方法。采用电气强度测试中描述的步骤干燥、测量和放置试样。

尽量快速将电压精确升到要求的数值，避免过冲。在该电压下保压 1min。试验电压选择应由相关各方协商一致，如没有协定，应当使用 GB/T 8411.3 所给的数值。

4.5.11　相对介电常数、介电常数温度系数和损耗因子

把瓷作为绝缘介质的电容器接到交流电路上，在电压作用下，瓷介质会产生极化现象。瓷材料的相对介电常数是电容器的电极之间及电极周围的空间全部充满瓷介质时的电容与同样电极构型的真空电容器的电容之比值，它是瓷材料在交流电场下介质极化的一个参数。瓷材料介电常数的温度系数是温度升高 1℃时，相对介电常数的变化值与起始温度时的相对介电常数的比值。瓷材料介质极化的损耗和漏导电流的损耗统称为介质损耗。瓷材料的介质损耗正切，是外施加正弦电压与由此产生的电流之间的相位差的余角的正切值。

(1) 试验方法。按 GB/T 1409 中所描述的方法进行实验，如有必要可以用厘米和毫米级波长的电源。

试验的温度范围需由相关各方商定。GB/T 8411.3 中列出的相对介电常数和损耗因子测定可能仅在室温下进行。对于介电常数的温度系数，推荐测定室温到 100℃间介电常数变化的平均值。

(2) 试验设备。符合 GB/T 1409 的设备。另外还要有：

1) 一台能在 120℃±5℃保温的烘箱。

2) 一个干燥器。

3) 符合 GB/T 1216 的千分尺。

(3) 试样。试样和电极的形状应符合 GB/T 1409 中 4.1 的要求，优选形状为直径不小于 60mm、厚度在 1.5～5.0mm 之间的圆片，试样厚度的均匀性应在平均厚度的±1%之内，平均厚度应在整个试样面上系统测量。

GB /T 1409 中的试样尺寸有一定的灵活性，其最小厚度的设定是为了得到大约 1%的精度。除非设备的质量很好并完全屏蔽，否则厚度增加会使电容量下降，测量精度下降。

(4) 试验方法。用千分尺测量试样的厚度，精确到±0.01mm，装上合适的电极，试样应在 120℃±5℃的烘箱中保温 2h 后，再放入干燥器冷却。

试验准备好后，从干燥器中取出试样，立即放入充满干燥空气的测试设备中，按试验要求升高或降低测试容器的温度，试验温度按 GB/T 10580 的规定选择，见表 4.3-45。当试样的温度调到要求温度的±1℃后，按 GB/T 1409 进行测试。

表 4.3-45　　试验的标准温度条件

指定测试温度① (℃)	偏差② (℃)	指定测试温度① (℃)	偏差② (℃)
−65	±3	130	±2
−55	±3	155	±2
−40	±3	180	±2
−25	±3	200	±3
−10	±3	220	±3
20	±2	250	±3
23	±2	275	±5
27	±2	320	±5
40	±2	400	±4
55	±2	500	±10
70	±2	630	±10
90	±2	800	±20
105	±2	1000	±20
120	±2		

① 为 GB/T 10580 中推荐温度，只要当事各方同意，可选择在标准范围内的其他温度。

② 在特殊情况下，可用更小的偏差，如±1。

推荐测试频率为：

48～62Hz、0.8～2kHz 和 1MHz。

若当事各方同意，也可以选用更高一些的测试频率。

试品数量及测试必须保证至少 3 个试样。

介电常数温度系数小的情况下，要用特殊的试验技术和

方法。此时须经当事各方同意。

如需要温度与介电常数的关系，应用平滑曲线连接各数据点，绘制介电常数和温度的关系曲线。如需要介电常数温度系数，选定对应温度的两点，画一条弦线，查出介电常数，按式（4.3-78）计算温度系数。

$$TK_\varepsilon = \frac{(\varepsilon_{T_2} - \varepsilon_{T_1})}{\varepsilon_{T_1}(T_2 - T_1)} \tag{4.3-78}$$

式中：TK_ε 为 T_1 和 T_2 间的平均介电常数温度系数；ε_{T_1}、ε_{T_2} 为温度 T_1 和 T_2 时的介电常数；T_1，T_2 为测量范围上的低点和高点温度。

在不同温度范围内测得的温度系数会有很大的差别。

4.5.12 体积电阻率

所有的绝缘材料包括电瓷材料都有一定的导电性。当在电瓷材料上施加一定电压时，会有泄流电流通过，其体积电阻率是在试样体积电流方向的直流电场强度与该处电流密度的比值，它表征着电瓷材料的绝缘性能。

（1）试验方法。本试验是在绝缘材料上施加直流电压1min后，测定绝缘材料的体积电阻率。

如果预计有附带的现象（如极化），经各方同意，测试可以在交流工频电压下进行，但结果通常比在直流电压下的结果低得多。

（2）试验设备。本试验应使用符合GB/T 10581的设备进行，另还需要下列设备、器皿和量具：

1）一台能在120℃±5℃保温的烘箱。

2）一个干燥器。

3）符合GB /T 1216的千分尺。

（3）试样。所用试样和电极形状应符合GB/T 10581的要求，优选形状为直径不小于60mm、厚度在1.5～5.0mm之间的圆片，试样厚度的均匀性应在平均厚度的±1%之内，平均厚度应在整个试样面上系统测量。

GB/T 10581的试样尺寸有一定的灵活性，厚度的允许偏差较大（小于平均厚度的5%）。为方便起见，本部分中体积电阻率测量用与介电常数测量相同的试样。

采用三电极系统，被保护的内电极直径至少应为试样平均厚度的10倍，外保护电极的宽度至少应和试样的厚度一样，内电极和保护电极的间隙至少达1mm，未保护电极的直径应和保护电极的外径相等。

（4）试验方法。按GB/T 10581的要求装好电极，将试样在120℃±5℃的烘箱里干燥至少2h，然后放在干燥器中冷却，测试时依次将试样放入测试设备，升温到所需要的测试温度。

按IEC 60093中的方法加100V或500V的电压，1min后，记录电压和流过的电流值。

按需要升高温度，重复上述试验。按GB/T 10581的要求，应在要求的最高温度点测试以后，降温并重新在室温下测量，以验明测试结果是否有变化。

试验应至少测试2个平行试样。

（5）$T_{\rho 1}$ 和 $T_{\rho 0.01}$ 的测定。如果需要，用人工曲线拟合的方法大约估算温度 $T_{\rho 1}$ 和 $T_{\rho 0.01}$，$T_{\rho 1}$ 和 $T_{\rho 0.01}$ 分别为电阻率下降到1MΩ和0.01MΩ时的温度。为此，测试的温度范围应当足够宽，以保证测试最低电阻率值低于 $T_{\rho 1}$ 或 $T_{\rho 0.01}$ 时的值。

以电阻率（MΩ）的log10值为纵坐标、温度（℃）为横坐标，用测量数据点画出一条光滑的曲线，读出电阻为1MΩ和0.01MΩ处相应温度 $T_{\rho 1}$ 或 $T_{\rho 0.01}$。

第 4 章 压 电 材 料

1 压电效应与压电晶体

1.1 压电效应

1880 年，P. 居里和 J. 居里兄弟发现：在某些晶体的特定方向施加压力（或拉力），晶体的一些对应的表面上分别出现正（或负）束缚电荷，其电荷密度跟施力大小成正比的现象，此现象被称为“压电效应”现象。不久，居里兄弟又证实了存在逆压电效应。1894 年 Voigt 指出，仅有无对称中心的 20 种点群的晶体具有压电效应。石英是压电晶体的代表，它一直被广泛采用，但压电材料及其应用取得划时代的进展却始于 $BaTiO_3$ 陶瓷。1947 年，美国的 Roberts 在 $BaTiO_3$ 陶瓷上加高电压极化处理，获得了陶瓷的压电性。1955 年，美国的 B. Jaffe 等人发现了压电性比 $BaTiO_3$ 陶瓷更优越的 PZT（$PbZrO_3$-$PbTiO_3$）压电陶瓷，从而大大加速了压电应用的发展。20 世纪 40 年代中期，人们还发现了生物的各种组织也具有压电性。特别是 1969 年发现聚偏二氟乙烯薄膜具有优良的压电性后，有机压电材料及其应用又迅速发展起来。

晶体的压电效应可以用图 4.4-1 来加以解释，图 4.4-1（a）表示晶体不受外力作用时，内部正电荷的重心与负电荷的重心重合，整个晶体的总电矩等于零（这是简化了的假定，实际上是会有电偶极矩存在的），因而晶体表面不带荷电。但是，当沿某一方向对晶体施加机械力时，晶体就会由于发生形变而导致正负电荷重心不重合，也就是电矩发生了变化，从而引起了晶体表面的荷电现象。当晶体受压缩时，材料的两端会产生一个与压力大小成比例的电荷量（或电场）[由图 4.4-1（a）变化至图 4.4-1（b）]；当施加应力的方向相反时，电荷的极性也随之变化，产生一个反向电场，如图 4.4-1（c）所示。在这种情况下，晶体表面带电的符号相反。反之，如果将一块压电晶体置于外电场中，由于电场作用，会引起晶体内部正负电荷重心的位移。这一极化位移又导致晶体发生形变，这个效应就称为逆压电效应。

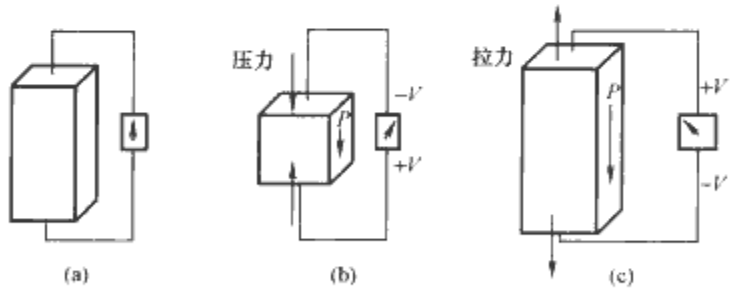


图 4.4-1 压电过程示意

（a）不受外力作用；（b）受到压力作用；（c）受到拉力作用

利用压电材料构成的压电器件已广泛用于电子学的各个领域。压电效应的应用首先是声体波（BAW）领域，早在 1916 年就有人用石英（α-SiO_2）晶体制作成水下发射/接收换能器，并利用其采用回波法探测沉船和海底。1921 年科研人员相继研制成功石英谐振器和滤波器，开创了压电晶体在频率控制和通讯方面的应用。压电材料及其应用随之遍及日常生活的每个角落，人们几乎每天都离不开压电应用。打火机、煤气炉、汽车发动机等的点火要用到压电点火器；电子手表要用到压电谐振器；声控门、报警器和儿童玩具等要用到压电蜂鸣器；银行、商店、超净厂房和安全保密场所的管理，以及侦察和破案等要用到能验证个人笔迹和声音特征的压电力敏传感器。家用电器产品中也广泛使用到压电器件，如电视机的压电陶瓷滤波器、压电声表面滤波器、压电变压器和压电风扇、收录机的压电微音器、压电扬声器和压电马达、收音机的压电陶瓷滤波器和高保真压电喇叭、电唱机的压电拾音器和压电马达、闪光灯的压电高压发生器等。在信息技术领域，压电材料的重要应用是由它构成的高灵敏度、高可靠性的传感器。

随着信息技术的快速发展，对 SAW（声表面波）技术及 BAW（声体波）技术在性能特征方面提出了下列要求：

（1）高频率、大带宽。

（2）高稳定、低插损。

（3）大时间带宽积、高位抽头。

（4）复合功能。

亚微米（半导体）技术的快速发展为 SAW（声表面波）技术及 BAW（声体波）技术实现上述性能特征奠定了良好的基础，同时也对压电晶体材料的发展提出了新的要求：

（1）开发性能优异的新品种。

（2）研制大尺寸、结构完美的压电晶体材料。

（3）开发具有复合功能的压电晶体材料。

1.2 压电晶体

凡具有压电效应的晶体均称为压电晶体。压电晶体产生压电效应的特性称为晶体的压电性。压电晶体是一类重要的电子功能材料，也是信息领域中的重点基础材料之一。压电晶体是信息科学与材料科学两个学科交叉的产物，已成为信息领域中多个新型学科发展的材料基础。用压电晶体制成的各类电子器件具有对信息的采集、传递、转换、处理、显示、执行及对抗等功能。现在压电晶体已成为材料科学的发展前沿之一，也是发展我国现代高科技的关键和核心内容之一。

自 1880 年 P. 居里和 J. 居里兄弟在天然石英（α-$Si(O)_2$）晶体（压电水晶）上发现压电效应后，已研究并进行测量的压电晶体已达近千种。除天然石英之外，研制出了罗息盐（酒石酸钾钠，$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$）、磷酸二氢铵（$NH_4H_2PO_4$，简记为 ADP）、磷酸二氢钾（KH_2PO_4，简记为 KDP）、EDT、DKT 和 LH 等压电单晶。但由于它们的性能存在某些缺陷，随着 20 世纪 50 年代以后人造石英的工业化大量生产和压电陶瓷性能的不断提高，这些晶体大多数已基本不用。

人造压电水晶（人造石英晶体）是以熔炼水晶为原料，用人工方法创造高温、高压、水热温差条件，让 SiO_2 蒸发到籽晶上再重新结晶出来的水晶。

近几年来，国内和国外一样，在压电材料的开发应用方面取得了较大进展，但压电晶体的基础研究工作未见到大的成效。与此同时，美、日、英和西德等关于压电材料及其应

用的研究工作虽然并不十分活跃，但关于铁电体唯象理论和电致伸缩材料方面的研究取得了十分引人注目的成就。

晶体是否具有压电性，取决于晶体的结构及结构对称性。在32种点群中，只有20种点群的晶体才可能具有压电性。压电晶体首先必须是不导电的（至少是半导体性的），同时结构还必须有带正电荷和负电荷的离子或离子团，所以压电晶体一般是离子型晶体或离子团组成的晶体。它只存在于无对称中心的晶类中，432点群的晶体虽无对称中心，但由于它们的对称性较高，所有压电系数分量为零，因此它们没有压电效应。所以压电晶体可能存在于1；2，m；222，mm2；3，32，3m；4，422，4mm；6，622，6mm；$\bar{6}$，$\bar{6}$m2；23，$\bar{4}$3m等20种无对称中心点群的晶体中。

在32种点群的晶体中，有21种点群的晶体不是中心对称的，在这些无对称的晶体中，有20种点群的晶体可能具有压电性，属于压电晶体，称为压电体。

在压电晶体中，又有10种点群的晶体具有唯一的单向极轴，即存在自发性，可能具有热释电性，属于热释电体。

在热释电晶体中，有些晶体在一定的温度范围内其自发极化方向能随外电场方向转化，晶体的这种特性即成为铁电性。具有铁电性的晶体称为铁电体，因为它与铁磁体在许多物理性质上具有一一对应之处（电滞回线对应磁滞回线，电畴对应磁畴，铁电一顺电相变对应铁磁一顺磁相变，电矩对应磁矩等）。铁电体的介电性能随温度变化的关系呈现异常特性，在居里温度时，其介电常数呈现极大值，超过居里温度时，其介电常数随温度的变化遵循居里一外斯定律，这类晶体即称为铁电体。

所以具有铁电性的晶体，必然具有热释电性和压电性，具有热释电性的晶体必然具有压电性，但却不一定具有铁电性。压电晶体、热释电晶体、铁电晶体都属于介电晶体。换句话说，介电体包含着压电体，压电体包含着热释电体，而热释电体包含着铁电体。铁电体不但具有铁电性，也具有热释电性、压电性和介电性。铁电体是介质晶体、压电晶体、电晶体的亚族，如图4.4-2所示。

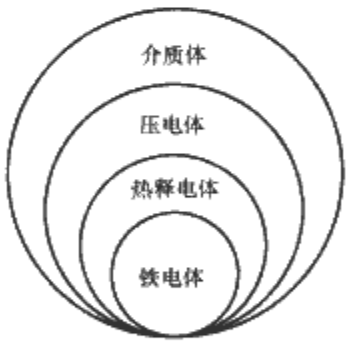


图4.4-2 铁电晶体与介质晶体、压电晶体和热释电晶体之间的关系

1.3 铁电体

铁电体是具有自发极化的晶体，其自发极化有两个或多个可能取向，在外电场作用下，自发极化取向可以发生改变。

铁电体的核心是自发极化。自发极化的出现在晶体中形成了一个特殊极性方向，每个晶胞中原子的构型使正负电荷中心沿此方向发生相对位移，形成电偶极矩，在晶体所属点群的任何对称操作下，特殊极性方向保持不动。在32个晶体点群中有10个点群具有特殊极性方向，这10个点群称为极性点群，它们是1（C_1）、2（C_2）、m（C_s）、mm2（C_{2V}）、4（C_4）、4mm（C_{4V}）.3（C_3）、3m（C_{3V}）、6（C_6）、6mm（C_{6V}），只有属于这些极性点群结构的晶体，才可能具有自发极化。

铁电体在微观上的主要特征是存在电畴。晶体在整体出现自发极化时，其两端将出现正、负束缚电荷，束缚电荷产生的退极化场在晶体内部与极化相反，使静电能升高。在受机械约束时，伴随自发极化产生的应变还使机械能增加，所以均匀极化状态是不稳定的。为降低系统能量，晶体分成若干电畴，在无外电场的热平衡状态下，电畴内部电偶极子沿同一方向排列，但不同电畴中的电偶极子方向不同。电畴的出现使静电能和应变能降低，但畴壁的存在引入了畴壁能，总自由能取极小值的条件决定电畴的稳定构型。

在热释电体中，晶体内部所有晶胞的自发电矩都全部指向同一方向。这时极化束缚电荷将在晶体内部和外部建立起退极化电场。在退极化电场的作用下，晶体内部和外部媒质中的自由电荷被吸引到晶体的表面，建立起自由电荷屏蔽层，从而使晶体内部和外部电场均为零。在铁电体中情况却有所不同，既然铁电体的自发极化是能被电场重新定向的，那么晶体内部在退极化场的作用下，就会分裂出一系列自发极化方向不同的小区域，使其各自所建立的退极化电场互相补偿，直到整个晶体对内、对外均不呈现电场为止。这些由自发极化方向相同的晶胞所组成的小区域便成为电畴，分隔相邻电畴的界面称为畴壁。

在晶体的电畴中，内部电偶极子沿同一方向，但不同电畴中电偶极子方向不同。电畴对外界条件是敏感的，温度、电场、应力等各种场的变化都可能造成电畴的变化，电畴结构的变化和电畴的运动将会影响所测的性能，如：弹性、介电常数、压电系数以及它们的色散特性等。因此，对电畴的机构和运动的研究有着十分重要的意义。电滞回线就是电畴变化运动的一种宏观表现。对于反铁电体，与铁电体相比，它们的电畴结构又有所不同。图4.4-3是简立方晶格中偶极的反平行排列和平行排列。铁电体类似于P状态的极性晶体，晶格中偶极子在一个方向排列，反铁电体则类似于A状态的反极性晶体。两个反平行排列的子晶格套构成一个超晶格结构，在子晶格中的偶极子是同向排列的，但两个子晶格的方向是相反的。当施加诱导电场，使这种反平行排列的偶极子沿外场方向平行排列之后，反铁电晶体中的电畴就类似于铁电体的电畴，也表现出电滞回线的方式，只不过反铁电体是超过一定电场以后才表现出这种特性，在P—E曲线上就表现出二重滞后回线的特征。

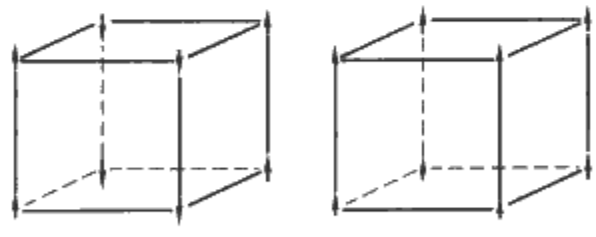


图4.4-3 简立方晶格中偶极的反平行排列A和平行排

铁电体的电畴中自发极化允许的取向取决于该晶体原型的对称性，即在铁电体原型结构中与铁电体极化轴等效的轴向。在铁电体中，畴壁的取向必须保证相临电畴在畴壁各个方向上所产生的自发极化能够相容，否则晶体的畴壁区域将会出现非常强的局部内应力。施加一个相当强的电场，可以使一个多畴晶体变为单畴晶体，或者使单畴晶体的自发极化反向，这种极化反转过程主要包括4个阶段：新畴成核、畴的纵向长大、畴的横向扩张和畴的合并。图4.4-4示出了钙钛矿结构铁电体的极化反转过程。

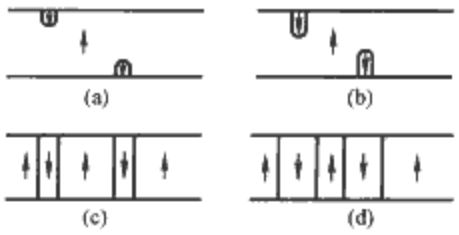


图 4.4-4 钙钛矿结构材料的极化反转过程示图
(a) 反向畴成核；(b)、(c) 纵向长大；(d) 横向扩张

需要指出的是，电滞回线的出现是判断晶体是否为铁电体的必要但不充分的条件。例如驻极体在黏滞环境中具有高密度的、可动的带电缺陷，在大电场作用下，这些带电缺陷被极化，形成一个电滞后。然而这些极化态不是热平衡态，随着时间变化将弛豫回到平衡基态。与铁电体不同，其滞后性质全部由缺陷化学所产生。

晶体的铁电性只存在于一定温度范围内，当温度超过居里温度 T_c 时，铁电体转变为顺电体，自发极化消失。当温度达到居里温度 T_c 时，介电常数反常。当 $T>T_c$ 时，沿铁电体自发极化方向的低频介电常数与温度的关系为

$$\varepsilon_r(0)=\varepsilon_r(\infty)+\frac{C}{T-T_0}$$

式中：$\varepsilon_r(0)$和 $\varepsilon_r(\infty)$分别为低频相对介电常数和光频相对介电常数；C 为居里常数；T_0 为居里—外斯温度。

对于二级相变铁电体，$T_0=T_c$，对于一级相变铁电体，$T_0<T_c$，$\varepsilon_r(\infty)$比 $\varepsilon_r(0)$小得多，且与温度基本无关，通常可以忽略，于是有

$$\varepsilon_r(0)=\frac{C}{T-T_0}$$

铁电相变是典型的结构相变，自发极化的出现是晶体中原子位置变化的结果。从晶体结构和自发极化的关系，可将铁电体分为含氧八面体的铁电体、含氢键的铁电体、含其他离子基团的铁电体以及铁电聚合物和铁电液晶。含氧八面体的铁电体因在实际生活中的巨大应用，是铁电体研究的主要方向，根据氧八面体的排列方式，它可以从结构上进一步分为：钙钛矿结构、铌酸锂结构、钨青铜结构和铋层类钙钛矿结构铁电体。对于含氧八面体的铁电体，氧八面体中离子偏离中心的运动对自发极化作了主要贡献。

衡量铁电性的主要指标有：

(1) 电滞回线。电滞回线是铁电体的特征曲线，可用电滞回线测量仪测出。图 4.4-5 是铁电体典型电滞回线示意图，图中横坐标为电场，纵坐标为极化强度。当电场从零开始增加时，自发极化沿电场方向的电畴变大，而自发极化与电场方向相反的电畴变小，这样极化强度随着外电场的增加而增加，如图中的 OA 段曲线所示。电场强度继续增大，极化强度达到饱和。此后，极化强度随外电场线性增加，如图中 BC 段曲线。在纵坐标 P 上所得的截距 P_s，被称为饱和极化强度，相当于每个单畴原来已经存在的自发极化强度。电场从图中 C 处开始下降，极化强度也会随之减小，当电场为零时，极化强度并不消失，仍然存在剩余极化强度 P (外电场为零时，铁电陶瓷剩余的极化强度)，将电场沿反方向增加，到达图中的 E_c 处时，陶瓷的极化强度为零。反向电场继续增大时，极化强度反向，当反向极化强度达到饱和以后，再减少反向电场，则极化强度沿另一路线 FC 变化。

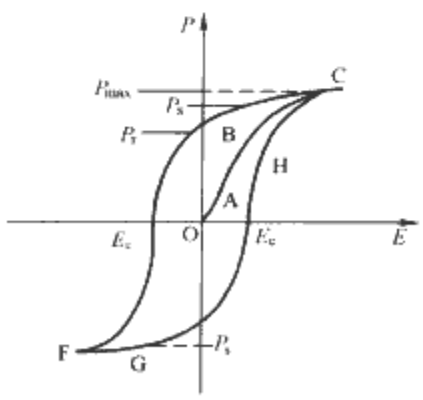


图 4.4-5 铁电体电滞回线示意图

(2) 矫顽电场强度 E_c。E_c 被称为矫顽电场强度，是对压电陶瓷施加反向电场，使原来陶瓷内部剩余极化强度为零时的电场。不同材料的矫顽场强是不同的，PZT 基压电陶瓷的矫顽场强 E_c 一般在10～30kV/cm 之内。

反铁电的结构和铁电体相近，但相邻的子晶格却是沿着反平行方向产生自发极化的。因此，反铁电体从宏观上看，其总自发极化强度为零。“反铁电体”一词是类比着反铁磁体来命名的。反铁电体随着温度改变发生相变，高温时往往是顺电相（指大多数反铁电体的情况，当然也有例外），在相变温度以下，则变成对称性较低的反铁电相。由于它在反铁电相时不存在净电矩，所以不存在像铁电体那样的电滞回线，它和铁电体的相同之处是：在相变温度时，介电常数出现反常值；在相变温度以上，介电常数与温度的关系遵从居里—外斯定律。

对反铁电体的理论研究很多，早期比较成熟的是热力学理论，近年用晶格动力学柔软光学膜解释反铁电相变也是比较成功的。但是，反铁电体近年之所以引起人们的重视，不仅是由于对其理论的研究具有重要性，而且是在应用上有了新的发现。反铁电体在电场强迫作用下，可使它向铁电相转变（反映到极化强度与电场关系上，出现双电滞回线）。伴随着反铁电—铁电相变，会出现比较大的应变（约 10^{-8}），这种应变可以比压电效应所产生的应变（约 10^{-4}）大一个数量级左右，因此利用这个原理研制出了大功率的水声、超声换能器。另外，利用反铁电体的改性固溶体可以变成铁电体，这是我们熟知的。例如：反铁电体 $PbZrO_3$ 和 $NaNbO_3$，可分别同 $PbTiO_3$ 和 $KNbO_3$ 组成二元系铁电陶瓷 PZT 与 KNN，这是目前广泛使用的压电陶瓷材料。但总的来说，反铁电体的研究和应用，相对铁电体来说，还是比较薄弱的，有待今后进一步发展。

压电材料的研究正在从早期的经验积累模式研究阶段（第一阶段）向逐步形成自己的学科——材料科学模式研究阶段（第二阶段）转变。压电晶体宏观性能与微观结构关系的研究，特别是矩阵理论的引入，对材料压电性能的定性预测发挥了重要的作用。随着未来材料科学的不断发展，将从材料科学阶段进入分子剪裁与设计阶段（第三阶段），从而不仅可以对压电性能进行定量计算，而且为了改善材料压电性能，还可以对功能基因进行裁剪设计。至今最重要和用量最大的压电材料仍是石英（α-SiO_2），其次是铌酸锂（$LiNbO_3$）、钽酸锂（$LiTaO_3$）、硅酸铋（$Bi_{12}SiO_2$）和硅酸镓镧（$La_3Ga_5SiO_{14}$）。此外，氧化锌和氮化铝等压电薄膜已是当今微波器件的关键材料。

$BaTiO_3$ 是最早发现的压电陶瓷，其缺点是频率温度特性差。但用 Pb 和 Ca 部分取代 $BaTiO_3$ 中的 Ba，可改善频率温度特性。至今还有部分压电换能器用 $BaTiO_3$ 陶瓷生产，像 $BaTiO_3$ 那样的单元系压电陶瓷，还有用 Mn、W、Ca、Bi、La 和 Nb 等改性的 $PbTiO_3$，其有良好的压电性能，是生产高频滤波器的良好压电陶瓷。

PZT 具有机电耦合系数高、温度性能好和居里温度（约 300℃）高等特点，它的出现使压电陶瓷产生了划时代的变化。在 PZT 的基础上，日本 1965 年研制成功的 $PbZrO_3$-$PbTiO_3$-$Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ 三元系压电陶瓷（简称 PCM），其性能良好，至今仍在应用。1969 年我国张

福学及其合作者研制成功的 $Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O_3$—$PbZrO_3$—$PbTiO_3$ 三元系压电陶瓷（简称 PMS），性能胜过 PZT 和 PCM，获国家发明奖，至今仍在广泛采用。

当今实用化的有机压电材料的代表是聚偏二氟乙烯（简称 PVF_2），具有压电性强、柔性好，以及其声阻抗与空气、水和生物组织的阻抗接近等特点，故在国内外已广泛应用。

2 单晶体压电材料

单晶体压电材料种类很多，除少数是只具有压电效应的晶体（如石英、CdS、ZnO、AlN，其中 CdS、ZnO 等兼有压电性和半导体性）外，其余大多数是铁电晶体。

2.1 仅有压电性的单晶体材料

2.1.1 石英（SiO_2）

石英晶体属 32 点群，其六角晶胞的 c 轴沿三重轴，a 轴和 b 轴分别沿 2 个互成 120°的二重轴。晶体物理坐标系的 z 轴与 c 轴平行，x 轴沿 a 轴，y 轴由 x 轴和 z 轴根据右手螺旋法则确定，如图 4.4-6 所示。石英晶体的 z 轴又称为光轴，光线沿此轴通过晶体时不产生双折射现象；x 轴又称为电轴，沿 x 轴或 y 轴施加应力时，在 x 轴产生压电效应；y 轴又称为机械轴，沿 y 轴或 x 轴施加应力时，在 y 轴不产生压电效应，只发生形变。由晶体物理学的知识可知，石英晶体只有 2 个独立的压电常数 d_{11} 和 d_{14}。

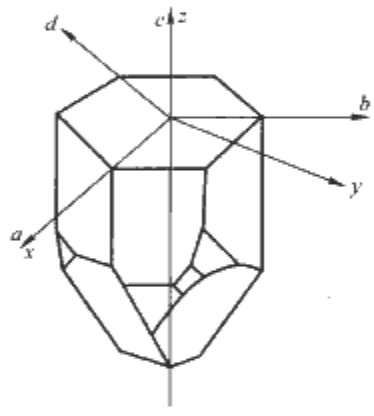


图 4.4-6 石英晶体的晶轴和晶体物理坐标轴

石英晶体有天然发育的，也有人工培育的。实用的石英晶体主要是人工培育的，通常采用水热法利用高压釜在 SiO_2 过饱和溶液中生长，目前已形成产业规模。

石英晶体主要用来制作压电谐振器，用于频率选择和控制。其特点是机械品质因数高、频率温度系数小（选择一定的切形甚至可以制作零温度系数的谐振器）。

2.1.2 锗酸铋（$Bi_{12}GeO_{20}$）

锗酸铋是 1967 年出现的人工合成的压电晶体，其熔点约为 935℃，不溶于水。晶体在结晶学上属于立方晶系点群 23，在熔点以下并没有发生其他相变。由于锗酸铋不具有唯一单向极轴，故无热释电性与铁电性，晶体当然也不需要做人工极化处理。

由于晶体的立方晶格结构可以消除热膨胀系数变化的影响，所以这种晶体用来产生纯振动模式是比较理想的。作为高频换能材料，锗酸铋的（111）晶片用作厚度伸缩模式换能器（k～0.155），（110）晶片用作厚度剪切模式换能器（k～0.235），都可以产生纯振动模式。剪切波的机械阻抗比较低。

除了它的换能特性外，锗酸铋还有一些特点可使它作为优越的高频声学介质来使用。一个突出的特点是它具有低的声传播速度，约为铌酸锂（$LiNbO_3$）的一半，即在同样长度的晶体上，锗酸铋能产生 2 倍的时延（其表面波速度为 1680m/s），同时具有立方晶格结构，它在许多方面可以获得纯的传输模式；另一个特点是锗酸铋晶体的损耗很低，在室温时，500MHz 的机械 Q_m 值为 1.27×10^5。因此它是微声延迟线的理想材料。

锗酸铋晶体主要用来制作延迟线，在深高平和超高频声学器件中获得应用。它也可以用来制作用于保密通讯的数字信号双关器、相控位雷达的带状和色散延迟线、以及可编程序延迟线和低损耗色散延迟线等。

锗酸铋晶体的生产工艺主要采用提拉法从熔体中生长大块单晶。

2.1.3 镓酸锂（$LiGaO_2$）

镓酸锂 1964 年见于报端，是一种无色透明的晶体。镓酸锂晶体结构对称性属正交系点群 2mm，但自熔点以下直到液氮的低温都观察不到铁电性。

作为压电材料，镓酸锂具有一些优良的特性：①纵向模式有中等大小的耦合因子和机械阻抗；②高的机械 Q_m 值；③良好的化学稳定性；④低的介电常数。这种材料的熔点约在 1570℃（固液同成分熔化），在高达 700℃的温度下，仍可以作为换能材料使用。

镓酸锂晶体适宜制作高频带换能材料。Z 切片可以研磨到 10μm 以下的厚度，作为换能器粘合到熔石英（声介质）上，其中心频率为 300MHz，并且有良好的换能特性。镓酸锂与铁电晶体铌酸钡钠具有相同的点群对称性，它虽不及铌酸钡钠的偶合系数大，但它有较低的介电常数，可以在宽广温度范围内使用，不需作极化处理，因而显现出优越性。

镓酸锂晶体可以用熔盐法、水热法、提拉法和坩埚下降法等技术生产。

2.1.4 锗酸锂（Li_2GeO_3）

锗酸锂是无色透明的微溶于水的晶体，其熔点为 1240℃，容易用提拉法生长单晶。锗酸锂单晶不是铁电体，属于正交晶系点群 mm。该晶体具有较大的压电性，可作为压电换能器材料使用。

Z 轴方向（c 轴）厚度振动的机电耦合系数 k_{33} 为 0.31，而 X 轴和 Y 轴的耦合系数很小，分别为 0.04 和 0.08。

由于锗酸锂的 Z 切片具有纯厚度伸缩振膜和较大的耦合系数，同时具有与优良的声光材料钼酸铅（$PbMoO_4$）等匹配很好的声阻抗（Li_2GeO_3 的声阻抗为 22×10^6 kg（s·m²），$PbMoO_4$ 的声阻抗为 26×10^6 kg/（s·m²），所以锗酸锂可用作声光偏转（或声光调制）的机电变换换能器。

锗酸锂单晶可用高频感应加热炉或电炉以普通的拉晶技术生长。

2.1.5 硅酸镓镧（$La_3Ga_5SiO_{14}$）

硅酸镓镧（$La_3Ga_5SiO_{14}$，简写为 LGS）晶体呈浅黄色，与石英的结构相同，同属三方晶系、32 点群的。它的物理性能与石英相同，无相变点，其机电耦合系数比石英的大，适宜于压电元器件的小型化。

与石英晶体相比，LGS 晶体具有大得多的机电耦合系数，所以用它制成的谐振器的动态电感比石英的同类产品低 2～3 倍；LGS 具有适宜模式的弹性模，密度又比石英大 2.2 倍，有可能生产厚度切变及面切变模式的谐振器频率比石英的低；LGS 的声频衰退值只有石英的 4/5，因此可应用在压控晶体振荡器与宽频带滤波器的制造。

硅酸镓镧（$La_3Ga_5SiO_{14}$）单晶的生长可在铱坩埚中采用提拉法进行。

2.1.6 正磷酸铝（α-$AlPO_4$）

正磷酸铝（α-$AlPO_4$）晶体又称为 α 块磷铝矿（α-berlinite），属三方晶系，与水晶的结构相同，具有等同电子。虽然正磷酸铝晶体的研究始于 1935 年，但直到 1954 年美国的 Stanly 才成功地在 c 轴方向生长出比较大的晶体。到 1975 年，随着声表面波的发展，需要研究一种能用于体波及声表

面波器件的具有良好的温度特性、满意的机械性能和高耦合系数的材料时，这种材料才得到重视和发展。

α—$AlPO_4$ 晶体的优点较多，它的耦合系数在体波与声表面波的应用中比人造石英的大 2～4 倍。α—$AlPO_4$ 晶体可以用来制作体波及声表面波元器件，还可以制作压控振荡器、温度补偿晶体振荡器等。在体波谐振器方面，Y 旋转切 θ 角在－38°至＋30°之间的频率温度性能与石英相同切角的性能相比，除了 AT 与 BT 切型的相近似外，其他均比石英的温度系数的角度灵敏度要好。由于 α—$AlPO_4$ 晶体的耦合系数比石英大，用它制成的滤波器带宽也比石英的同类产品大 2 倍。

与人造石英一样，α—$AlPO_4$ 晶体的也采用水热法生长。

2.1.7 磷酸镓（$GaPO_4$）

$GaPO_4$ 是无色透明的晶体，属于 $M^{3+}X^{5+}O_4$ 类化合物（M^{3+}＝Al，Ga，Fe 或 Mn；X＝As 或 P），晶体结构属于 32（D_3）点群。这类化合物大多数都具有石英型结构，在正常条件下都是十分稳定的。这类晶体中人们最熟悉的是板磷铝矿晶体磷酸铝（AlPO），该晶体在自然界已有发现，并且在压电应用上作为石英的替代材料已经研究了几十年。当时对其进行研究是为了探索一些能取代石英的新压电材料，以便制作工作温度更高的压电压力换能器。

奥地利科学家在 20 世纪 80 年代开始 $GaPO_4$ 特性的研究。作为一种新的压电材料，类石英晶体磷酸镓（$GaPO_4$）变得越来越重要。它几乎具有石英所有的优点，即没有一阶热电性；存在压电振荡器和滤波器所需要的温度补偿切型，并且具有很高的电阻率；它的机电耦合系数比石英高得多，并且在高达 1205K（933℃）时，其物理特性也只有很小的变化 。这些特性使其在高温压电器件的应用上成为非常有吸引力的材料。1994 年由奥地利 AVL 公司投入市场的采用 $GaPO_4$ 晶体的器件，即用于燃气轮机的非冷却小型压力换能器，从中已可以看出这种材料的一些优点是很明显的，用其制作的器件具有优良的热动力特性、很高而又非常稳定的灵敏度以及很好的线性压电性，在测量精度和可靠性方面都大大超过了石英换能器，很适合测量内燃机和多阀发动机，将其与汽车发爆探测的火花塞接合器或内燃机的热线点火塞接合器相结合，能提供理想的压力测量。另外，无论是在 BAW 还是在 SAW 应用上，$GaPO_4$ 都具有与石英相似的零频温度系数切型，并且其耦合系数比石英大得多。另一方面，这种材料不存在 α-β 石英相变。用这种材料不但可以制成带宽宽得多的带通滤波器，而且能用于很高的温度范围（>1000℃），传感器的应用也是如此。将 $GaPO_4$ 与石英用作下一代移动通讯滤波器的压电材料进行比较，结果表明：由石英制作的中心频率为 20MHz 的 Jaumann4 极滤波器的带宽为 107kHz，而用 $GaPO_4$ 制作的同样滤波器带宽可以达到 145kHz。

随着对这种材料研究的深入，其晶体生长工艺和晶体质量将进一步提高和完善，其应用范围也会迅速扩大。例如高温处理和石油钻探用压电压力传感器、用于喷气发动机和发电厂汽轮机的压电加速度计、高温压电超声换能器等均可采用这种材料。而就目前来说，这种材料的用途还无法完全估量。

$GaPO_4$ 是用 Ga 和 P 交替取代 Si 原子，根据 α—SiO_2 结构就能推导出它的晶体结构。每个晶胞的分子数为 3，与石英相同，但是，由于 Ga 和 P 的交替排序，所以其 c 方向的晶胞尺寸是石英的一倍。

$GaPO_4$ 存在空间群为 $p3_121$ 和 $p3_221$ 的 2 种反型结构，从而形成结构的右旋和左旋变态。表 4.4-1 列出了 $GaPO_4$ 在不同温度下的结构参数，其结构由拐角连接的四面体组成，拐角处是氧原子，而四面体的中心是 Ga 或 P。与石英相比，这些四面体显示较大的平均倾角（GaO_4 为 20.8°，而 PO_4 为 25.6°）由于这种倾斜，所以整个结构具有三重的螺旋轴 3_1 或 3_2。石英在 846 K（573℃）发生 α-β 相变时，这种倾角变为零，从而形成六重螺旋轴结构，并且纵向压电效应突然消失，而 $GaPO_4$ 就没有这种现象，它几乎不存在这样的 α-β 相变，而一些优良的特性如 c_{56} 刚性却仍然保留着。

表 4.4-1 换能用的晶体性能

材 料	模式(符号同 12,3)	取向	耦合系数 k	相对介电常数 $\varepsilon/\varepsilon_0$	频率常数 (m·Hz)	声阻抗 Z_0[10^6kg/(s·m²)]
$Bi12GeO_2O$	TE	[111]	0.155	38.0	1670	30.6
	TE	[110]	0.235	38.0	850	15.3
$LiGaO_2$	TE	Z	0.30	8.5	3180	26.2
	TS	X	0.17	7.0	2550	21.4
	TS	Y	0.17	6.0	2900	21.2
$LiGeO_3$	TE	Z	0.31	10.0	3200	22.0
$LiSO_4 \cdot H_2O$	TE	Y	0.30	9.0	2735	11.3
α—$LiIO_3$	TE	0°	0.51	6.0	1033	18.5
	TS	90°	0.60	8.0	630	11.3
罗息盐	LEt	X-45°	0.65	$350\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$	1550	5.5
	LEt	Y-45°	0.32	$9.4\varepsilon_{22}/\varepsilon_0$	1170	4.1
ADP	LEt	Z-45°	0.28	$15.3\varepsilon_{31}/\varepsilon_0$	1625	5.9

2.2 压电热释电单晶体材料（铁电晶体、反铁电晶体、非铁压电热释电单晶体）

同压电效应类似，有些晶体可以因温度变化而引起晶体有表面电荷，这一现象称为热释电效应 。

热释电效应最早发现于电气石中[(Na，Ca)(Mg，$Fe)_3B_3Al_6Si_6(O, OH, F)_{31}$]，属三方晶系，具有唯一的三重结构。

热电效应是指某些晶体受温度变化影响时，由于自发极化的相应变化而在晶体的一定方向上产生表面电荷，其数学表达式如下：

$$\Delta P_s = p\Delta T$$

式中：ΔP_s 为自发极化强度变化量；p 为热释电系数；ΔT 为温度变化量。

由此可见，晶体中存在热释电效应的前提是具有自发极化，即在晶体结构的某些方面存在固有电矩。因此，具有对称中心的晶体将不可能具有热释电效应，这一点与压电晶体一致。但是，压电晶体不一定都具有自发极化，因为压电效应反映的是晶体电量与机械应力之间的关系。一般来说，这种中心电荷的相对位移，在不具中心对称的压电晶体的不同方向将不相等，因而引起晶体总电荷变化，产生压电效应。对于热释电效应，晶体的电荷变化来自于晶体的温度变化，与机械应力不同，物体均匀受热时所引起的膨胀在各个方向是同时发生的，并在相互对称的方向上必定具有相等的膨胀系数，因此这些方向上所引起的正负电荷中心的相对位移也相等。故一般的压电晶体即使在某一方向上电矩会有一定变化，但总的正负电荷中心并没有发生相对位移，因而不会产生热释电效应。只有晶体的结构中存在着与其他极轴不相同的唯一极轴（极化轴）时，才有可能因热膨胀而引起总电矩

的变化，即出现热释电效应。由此可见，压电晶体不一定具有热释电效应，但热释电晶体中一定存在压电效应。

在32种晶体对称类型中，有10种具有极化轴，这10种晶体具有热释电效应。这些热释电晶体又可以分为两类：一类是具有自发极化，但自发极化不能被外电场所转向的晶体，如电气石、CaS、CaSe、ZnO等，通常称它们为热释电晶体；另一类是自发极化可以被外电场所转向的晶体，即铁电晶体，如$LiNbO_3$、$LiTaO_3$、$PbTiO_3$、$BaTiO_3$等。这些铁电晶体中的大多数可以制成多经陶瓷体，并具有剩余极化，就像单晶体一样显现热释电效应。陶瓷多晶体因制备简单、易于加工、成本低、性能易于改性，已成为一类很有前途的热释电材料。

热释电单晶材料（pyroelectric single crystal materials）是具有热释电效应的晶体材料。常用的热释电单晶材料主要有三甘氨酸硫酸盐晶系和氧化物单晶。三甘氨酸硫酸盐的分子式为$(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$，简称TGS，是由甘氨酸和硫酸以3∶1的摩尔比例配制成饱和水溶液，然后用降温法生长获得，且较容易得到大的优质单晶体，其结构属单斜晶系，居里温度T_c约为49℃，当温度高于T_c时，不存在热释电效应，当温度低于T_c时，点群为2，空间群为P_{21}，平行b轴方向产生自发极化，此时b轴为极性轴。TGS是典型的二级相变铁电体。通常铁电体需极化才具有热释电性质。

2.2.1 具有铁电性的热释电单晶

2.2.1.1 TGS单晶

TGS晶体的电极化强度P大，相对介电常数ε_r小，故材料优质因子P/ε_r也大，是一种重要的热释电探测器材料。该晶体垂直b轴存在解理面，方便于器件的制作，其主要缺点是易吸潮，机械强度差。但采用密封封装可以避免材料受潮。

已获实际应用的TGS晶体主要有以下3种：

（1）氘化TGS（DTGS）。将TGS用重水D_2O进行重结晶可实现氘化，从而使T_c可提高到60℃以上，P/ε_r略有提高。该材料主要用作热释电摄像管靶材料和傅里叶光谱仪中的中红外和远红外器件材料。

（2）掺L-α丙氨酸TGS（LATGS）。这种掺杂晶体的内偏场$E_b>3$ kV/cm时，表明晶体中掺入了足够量的L—α丙氨酸，从而使晶体具有锁定极化性质，即晶体不需极化就具有热释电性质；此外将晶体加热超过T_c后，再冷却到T_c以下，仍能恢复其热释电性质，具有较高的稳定性。掺L-α丙氨酸后晶体的ε_r和介电损耗都减小，故P/ε_r有所提高。LATGS是热释电探测器的良好材料。采用旋转圆盘法生长晶体，可以改进LATGS的均匀性。

（3）氘化LATGS（DLATGS）。兼有DTGS和LATGS两种晶体的优点，T_c高，具有锁定极化性质，适于制作工作温度高、性能稳定的器件，尤其适合用作热释电摄像管靶材料。

TGS还有几种相同结构的晶体，如三甘氨酸硒酸盐（TGSe）和三甘氨酸氟铍酸盐（TGFB）。目前正开展对TGS晶体的改性研究。例如以H_3PO_4或H_3AsO_4部分取代TGS中的H_2SO_4，可提高晶体的热释电性质。

2.2.1.2 钽酸锂（$LiTaO_3$）单晶

钽酸锂（$LiTaO_3$）单晶属三方晶系，c轴是极轴，具有氧八面体的ABO_3晶格结构。T_c为620℃，不易退极化。因为T_c高，故在很宽温度范围里P/ε_r值都较高，且变化不大，适合制作工作温度范围大的高稳定性器件。其介电损耗可低于2×10^{-4}，又是高归一化探测度的热释电探测器材料。

2.2.1.3 铌酸锶钡（$Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$，SBN）单晶

铌酸锶钡（$Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$）单晶属钨青铜结构。与$LiTaO_3$相比，其P和ε_r大，P/ε_r不高。ε_r大适合做小面积或多元器件。掺入少量La_2O_3或Nd_2O_3可克服其退极化的问题。

此外，还有钛酸钡（$BaTiO_3$）、钛酸铅（$PbTiO_3$）和锗酸铅（$Pb_5Ge_3O_{11}$）等单晶。这些晶体在高温下用提拉法生长，可获得高质量的单晶。其生长速率比水溶液法生长快，晶体物化性质稳定，机械强度高，但生长设备较复杂。

2.2.2 不具有铁电性的热释电单晶（非铁电晶体）

2.2.2.1 硫酸锂（$Li_2SO_4 \cdot H_2O$）

硫酸锂是水溶性晶体，不但具有压电性，而且具有热释电性，但它不是铁电体。硫酸锂属于单斜晶系点群2，Y轴是极性轴。

$Li_2SO_4 \cdot H_2O$的热释电系数p为1.6×10^{-6}C/(cm^2 · K)，比热容c为0.4J/(g · K)，热导率为17×10^{-3}W/(cm · K)。它的介电常数很小，所以品质因数$p/c\theta$较高，适于作大面积高频的红外热释电探测材料。它的缺点是在2.2μm、3.8μm和5.3μm处有透射峰，并且随温度升高其损耗角增大，从而使热噪声也相应增大。

硫酸锂晶体在水中的溶解度随温度上升而减小（即溶解度温度系数为负值），可利用蒸发法从水溶液中培育出大块晶体。

2.2.2.2 α碘酸锂（α—$LiIO_3$）

α碘酸锂属于非铁电性的极性晶体，具有旋光、热释电、压电、非线性光学、电光学效应。碘酸锂具有2种同质异构体，即α—$LiIO_3$和β—$LiIO_3$。

α—$LiIO_3$晶体无色透明，它不是铁电体，不存在内电场，具有较强的抗光性。α—$LiIO_3$晶体具有较高的压电耦合，低的声表面波速度和低的延时温度系数及功率流角为零的特性，是制作长延迟线的极好材料。它用于声表面波时最好的切向是Z切，其耦合电压最大，并且整个切向是恒定的，延时温度系数约为7×10^{-6}，功率流角及与此相关的变化率为零。

α—$LiIO_3$晶体具有优良的压电性能，将它作为超声器件，其声阻抗为181.423×10^6Pa/s，电容率矩阵元很小，相对电容率$\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0\approx6$，适宜制作高频探头。其机电耦合系数$k_t$达0.51，$g_{33}$很高（$g_{33}=322\times10^{-3}$ V · m/N），是换能器的良好材料。

碘酸锂在水中的溶解度较大，但它的溶解度温度系数却比较小，且为负值。所以宜采用恒温蒸发法生产。

2.2.2.3 锗酸铅（$Pb_5Ge_3O_{11}$）

自从20世纪70年代日本学者Iwasaki等人发现锗酸铅（$Pb_5Ge_3O_{11}$）单晶铁电性和电致旋光效应以来，锗酸铅晶体一直受到人们的关注。锗酸铅晶体具有小的介电常数和比较大的热释电系数，被认为是优秀的热释电探测器材料，而其旋光性则可应用于信息存储和信号处理等过程。此外，锗酸铅晶体还具有声光、电光以及光折变等性能，在声电器件、光电器件、远程感应器件、热成像器件等方面有潜在的应用价值。因此，锗酸铅晶体是一种具有多种用途的重要铁电单晶材料。

Newnham等人研究了锗酸铅单晶的结构，他们认为锗酸铅（$Pb_5Ge_3O_{11}$）在结构上主要由GeO_4和Ge_2O_7两种基团组成，以Ge为中心的GeO_4四面体与Ge_2O_7基团分层间

隔地沿 c 轴方向排列，Ge_2O_7 实际由上下 2 个 GeO_4 叠成，它们共用 1 个氧原子。在 177℃时，锗酸铅单晶发生铁电/顺电相变，晶体结构由三方晶系转变为六方晶系。

2.2.2.4 硫化镉（CdS）

纯硫化镉呈淡黄色，重掺硫化镉呈红褐色。它有两种结晶构造，一种为六方晶系纤维锌矿型构造，另一种为四方晶系的闪锌矿型构造。

硫化镉既具有一般半导体的电学性质，又具有特殊的光学特性。作为热释电材料，其生长方向为［0001］的 CdS 单晶，沿其光轴方向切片，对 10.6nm 波段的光吸收系数为 3%～5%，可满足红外窗口器件材料的需要。

硫化镉单晶多采用气相法生长获取。

2.2.3 反铁电单晶

$PbZrO_3$ 是典型的钙钛矿型反铁电晶体，它们的结构可用立方晶格来描写，每个格点代表一个结构基元。顶角为较大的 Pb^{2+} 占据，六个面心为 O^{2-} 占据，体心为较小的 Zr^{4+} 占据。这些氧离子形成氧八面体，锆离子处于其中心，$PbZrO_3$ 晶体在 503K 以上是顺电相，对称性是 O_h，是钙钛矿结构。当晶体处于 503K 以下，各离子将分别发生位移，生成了反铁电相，发生了结构相变，这种相变称为位移型相变。通过对晶体压电性的研究，$PbZrO_3$ 晶体的反铁电相没有压电性，就是说晶体压电系数 $d_{ijk}=0$（i，j，$k=1$，2，3），说明该晶体具有中心对称性。

2.3 压电半导体单晶体材料

近年来，压电半导体用在微声技术上作为制造换能器的研究发展很快，主要有 CdS、CdSe、ZnO、ZnTe、CdTe 等ⅡB-ⅥB 族化合物及 GaAs、CaSb、InSb、InAs、InSe、AlN 等ⅢA-ⅤA 族化合物。这些化合物大都属于闪锌矿或纤维锌矿的晶体结构。

2.3.1 属于闪锌矿结构的压电半导体晶体材料

闪锌矿结构属于立方晶系，点群 $\bar{4}3m$，它的晶格与金刚石结构十分相似，如图 4.4-7 所示。闪锌矿格子是由金属元素 A 离子（Zn^{+2}）的面心格子与非金属元素 B（黑色）离子（S^{-2}）的面心格子相对移动了 1/4 空间对角线套构而成的。B 离子呈面心立方密堆积的形式排列，而 A 离子则填塞离子半数的 B 的四面体空隙之中。

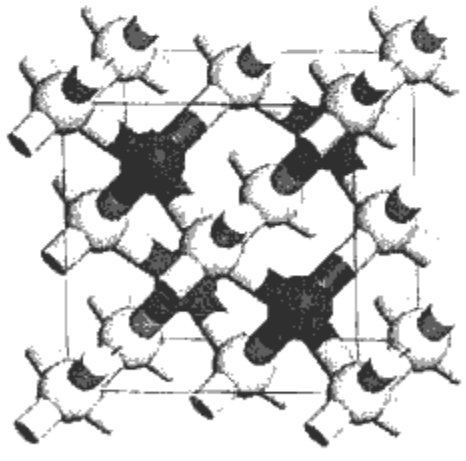


图 4.4-7 闪锌矿结构

ZnS、GaAs、CdTe、ZnSe、ZnTe 等晶体属于这种结构类型。

2.3.2 属于纤维锌矿结构的压电半导体晶体材料

纤维锌矿结构属于六角晶系，点群 6mm。若以 A 代表金属原子，B 代表非金属原子，则 A（或 B）位于整个六角柱大晶胞（包括 3 个单胞）的各个角顶和底心以及组成六角柱的 6 个三角柱中相间隔的 3 个三角柱的体心，形成与六角密堆相似的配置，如图 4.4-8 所示。

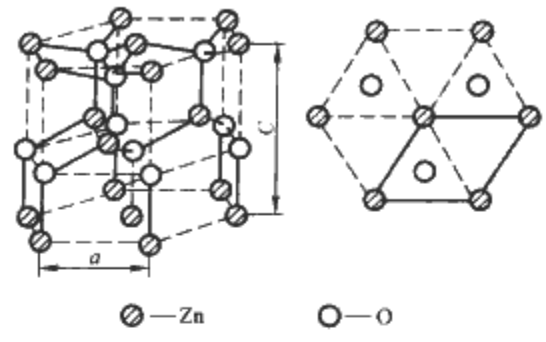


图 4.4-8 纤维锌矿结构

2.3.3 多晶体压电材料

多晶体压电材料主要是包括铁电陶瓷、反铁电陶瓷和铁电半导体材料。按照多晶体主晶相结构分类，大体上可分为：

（1）钙钛矿型铁电材料，主要包括 $BaTiO_3$、$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$（PZT）、$Pb_xLa_{1-x}[Zr_yTi_{1-y}]O_3$（PLZT）、$PbTiO_3$。

（2）钨青铜型（TB 型）铌酸盐铁电材料、铋层状结构（如 $Bi_3Ti_3O_3$，Bi_4TiO_{12}）、氧八面体结构（如铌酸锂、钽酸锂）。

（3）由氧八面体组成，相邻的氧八面体有公共的顶点。在这类铁电材料中，自发极化与氧八面体的三重轴平行，各氧八面体以共面的形式叠置起来形成堆垛。如铌酸型（$LiNbO_3$）晶体。

（4）铋系层状化合物。铋系层状化合物中由 $(Bi_2O_2)^{2+}$ 层构成与钙钛矿结构类似的层交替排列而成，具有疲劳特性好、介电常数低、漏电流小及开关电压低等优点。目前该类材料主要有 $SrBi_2Nb_2O_9$、$SrBi_2(Ta,Nb)_2O_9$ 以及其他具有 $(Bi_2O_2)^{2+}$、$(A_{m-1}B_mO_{3m+1})^{2-}$ 结构的材料。

另外一种划分方法是分为含铅陶瓷和不含铅陶瓷材料，例如：以 $BaTiO_3$ 为基，加入第二相，能够得到完全不含铅的弛豫性铁电压电陶瓷。

3 多晶体压电材料

3.1 铁电陶瓷

通常的陶瓷是各向同性的多晶烧结体，但铁电陶瓷是一种特殊的陶瓷，其中每一个晶粒都是一个小的铁电单晶。在直流电场的作用下，各晶粒中的自发极化沿最靠近电场的方向排列，总体出现沿电场方向的剩余极化，于是该方向成为特殊极性方向，与其他任何方向不再对称等效，而与此方向垂直的平面则是各向同性的。因此，这种陶瓷就具有压电性了。

陶瓷具有压电性必须满足 2 个条件：①晶粒有铁电性；②经过强直流电场处理。压电陶瓷就是经过人工极化处理的铁电陶瓷。铁电陶瓷是技术上最重要的铁电材料。从晶体结构看，铁电陶瓷主晶相具有钙矿结构、钨青铜结构、层状氧化物结构和焦绿石结构等多种。钙钛矿型铁电体（ABO_3）是应用最广泛的铁电体。锆钛酸铅（PZT）铁电陶瓷于 1954 年研制成功，此后铁电陶瓷发展十分迅速。目前按传感、驱动功能的机制，铁电陶瓷可分为以压电效应为主的驱动、传感功能的铁电陶瓷和弥散相变型弛豫铁电陶瓷。

3.1.1 以压电效应为主的驱动、传感功能的铁电陶瓷

这类铁电陶瓷材料有锆钛酸铅（PZT）、钛酸铅（PT）等。以改性 PZT 为代表的铁电陶瓷应用较早且较广泛。

大多数压电陶瓷是 ABO_3 型钙钛矿结构，图 4.4-9 以 $PbTiO_3$ 为例描述钙钛矿晶体结构。在居里点以上，钙钛矿晶体结构是具有对称中心的立方晶系，Ti^{4+} 处于氧八面体的中心，但氧八面体的空隙大于 Ti^{4+} 离子的体积，Ti^{4+} 可以偏离中心位置，由于晶胞是一个对称性很高的立方体，Ti^{4+} 在立方体内向上、下、左、右、前、后等 6 个方向偏离的几率一样，结果对中心的偏离为零，总效果是正、负电荷中心重合，不显极性。但在居里点以下，$PbTiO_3$ 的晶胞已经由立方晶系变为四方晶系。在立方晶系，边长 $a=b=c$，但到了四方晶系，$a=b\neq c$，即 c 轴变长或变短了。氧离子所在位置发生了变化，在四方晶胞里，Ti^{4+} 沿 c 轴偏离中心的机会比沿 a 轴和 b 轴偏离中心的机会大得多，这样在 c 轴产生了正、负电荷中心不重合，晶胞就产生极化，这就是自发极化。同样 Pb^{2+} 离子偏离氧八面体中心也造成一部分自发极化的产生，从立方相转变为四方相时，原立方晶胞的 3 个互相垂直的每一边都有可能伸长为四方晶相的 c 轴，但各部分的晶胞自发极化方向取向不同，这样晶体就出现了自发极化方向一致的小区域，即电畴。因为从立方相变为四方相时，每一个轴都有可能伸长为 c 轴，所以相邻的 2 个电畴相交只能是 90°或 180°，电畴相交的界面叫畴壁。未经极化的压电陶瓷内部各电畴的自发极化方向是不同的，它们互相抵消，极化强度为零。经极化后，各电畴的自发极化在一定程度按外电场的方向排列，所以其内部极化强度不为零，当撤销电场后，虽然有些电畴复原，但大多数电畴基本还是沿原来电场的方向排列。所以压电陶瓷内部的剩余极化强度不等于零，这样在陶瓷的上下内表面出现束缚电荷。由于存在束缚电荷，在陶瓷的上下表面（电极）出现自由电荷，自由电荷与束缚电荷异号且相等。

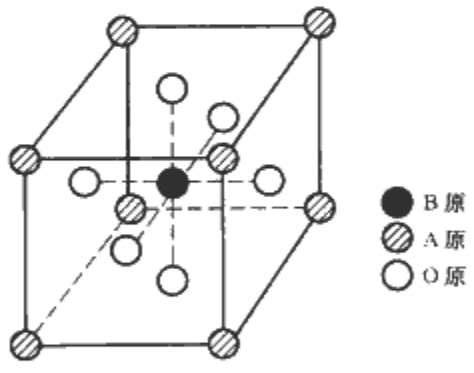


图 4.4-9 钙钛矿结构

3.1.2 弥散相变型弛豫铁电陶瓷

这类铁电陶瓷除具有自发极化机制外，在其晶体结构上有其特殊性且具有较大的电致伸缩系数，因此在电场作用下可产生与压电效应相比拟的应变。与压电性相比，电致伸缩效应具有滞后小、反应迅速、回零好等特点。

这类铁电陶瓷材料的代表有铌镁酸铅（PMN）、铌锌酸铅（PZN）和以它们为基的弛豫型铁电陶瓷，如PMN—PT，PZN—PT 等。

弛豫型铁电陶瓷是近年来广泛研究和迅速发展的一种非常重要的新型功能陶瓷材料。它具有介电常数高、电致伸缩效应大、无剩余极化、理论上无滞后、无老化、响应快、回零性好、驱动功率小、热稳定性好、低膨胀等优点，是制造多层电容器、微位移器驱动器、致动器、电光与记忆器件的理想材料，在集成电路、自动控制、超微细技术、微机器人以及超声等方面也有广阔的应用前景。目前，国内外研究较多和应用较广的弛豫型铁电陶瓷是铅系复合钙钛矿结构的 $Pb(B_1B_2)O_3$ 体系。其中 B_1 为低价阳离子，如 Mg^{2+}、Zn^{2+}、Fe^{3+}、Ni^{2+} 和 Se^{3+} 等；B 为高价阳离子，如 Nb^{3+}、Ta^{5+}、Ti^{4+}、W^{6+} 等，其中具有代表性的材料为 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$（简称 PMN）、$Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$（简称 PZN）和 $Pb(Sc_{1/2}T_{a1/2})O_3$（简称 PST）等。

自从发现弛豫型铁电陶瓷以来，铅基钙钛矿结构弛豫型铁电体以其优良的性能，在多层陶瓷电容器和电致伸缩器件等方面有着广阔的应用前景，受到工程界、科学家的广泛重视。同时，由于铅基钙钛矿结构的弛豫型铁电体的优良性能又来源于其在微观纳米线度上的结构和组成的复杂关系，从而也引起了理论学家的关注。

弛豫铁电体区别于正常铁电体的显著特征主要表现为：

（1）相变弥散（DPT）现象，即顺电—铁电相变是逐渐的，而不是突变的。其表现为介电常数与温度的关系曲线中介电峰的宽化，在高于居里温度时仍存在自发极化和电滞回线（即仍有铁电性）。

（2）频率色散，在低温侧介电峰值和损耗峰值随测试频率的提高而略向高温方向移动，同时介电峰值和损耗峰值分别略有下降和上升。针对弛豫铁电体的这些弛豫特性，人们先后提出了一系列理论模型来解释它，如 Smolenskii 的成分起伏理论、Cross 的超顺电态理论、有序—无序转变理论等。

3.2 反铁电陶瓷

反铁电（AFE）—铁电（FE）相变型铁电陶瓷。这类铁电陶瓷材料研究主要是从反铁电陶瓷锆酸铅（$PbZrO_3$）开始的。一般陶瓷材料的应变很小，这极大地限制了它们的应用。由于相变可以产生相当大的应变，这引起了人们广泛的研究兴趣，最初人们通过在 PZT 中加 Sn 来改善其应变性能，同时从理论上研究其结构机制，寻找铁电陶瓷产生更大应变的可能性。到目前这类材料已发展成为重要的铁电材料，它们的代表是 $Pb_{0.98}Nb_{0.02}[(Zr_{1-x}Sn_x)_{1-y}Ti_y]_{i-x}O_3$。这类材料的最大特点是因相变产生较大的应变。

目前实际应用的反铁电材料主要是改性的 $PbZrO_3$ 陶瓷。对 $PbZrO_3$ 进行改性掺杂，会使它的反铁电—铁电相变点降低，甚至可以降到室温以下；或者加一个极化电场，使它变成亚稳的铁电相。例如，用 Ba^{2+} 代替克原子百分数为 5 的 Pb^{2+}，或用 Ti^{4+} 代替克原子百分数为 1 的 Zr^{4+}，都可使 $PbZrO_3$ 变成铁电相。作为换能器材料，$PbZrO_3$ 多使用 Pb（Zr，Ti，Sn）O_3 三元系固溶体陶瓷。$PbZrO_3$ 晶体存在 2 个反铁电相的结构，即四方反铁电相（A_T）和正交反铁电相（A_0），纯的 $PbZrO_3$ 在室温时是正交反铁电相（直到居里温度），以一定量的 Ti^{4+} 代替 Zr^{4+}，就会改变成四方晶系反铁电相。实验发现，用一定量的 Nb^{5+} 取代 Zr^{4+}，也会出现相同的效果。另外，在 Pb（Zr，Ti，）O_3 中以 Sn^{4+} 取代（Ti，Zr）$^{4+}$，或用 La^{3+} 取代 Pb^{2+}，也可使四方反铁电相区扩大，而正交反铁电相区缩小。实际固溶体材料中还存在着三角（低温）铁电相 $F_{R(LT)}$ 和三角（高温）$F_{R(HT)}$ 以及顺电立方相 P（居里点以上）。在相变过程中，这些相单胞体积是按 $A_0<A_T<P<F_{R(LT)}<F_{R(HT)}$ 的顺序增加的。看来，从 A_0 转变到 $F_{R(HT)}$ 时，其比体积改变最大，高达 0.9%，但是这个相变靠电场诱导是不可能发生的。一般来说，只有四方反铁电相 A_T 在电场作用下才会变成铁电相 $F_{R(LT)}$，其比体积之差可从 0.5%变到 0.1%。

在居里温度以下，如果对 $PbZrO_3$ 施加一个直流电场，当电场大于某一临界值（例如大于 20kV/cm）时，$PbZrO_3$

也可以从反铁电态转变为铁电态。这时可以观察到 $PbZrO_3$ 的双电滞回线。其相变电场的值随温度的下降而增加。必须注意的是：反铁电体的双电滞回线与 $BaTiO_3$ 中也会出现的双电滞回线有本质的不同。$BaTiO_3$ 的电滞回线是在外加电场引起 $BaTiO_3$ 居里温度升高，使晶体从顺电相转变到铁电相的结果，是在居里温度以上发生的；而 $PbZrO_3$ 的双电滞回线则是在外加电场的强迫下，使晶体从反铁电相转变到铁电相的结果，是在居里温度以下发生的。

3.3 铁电半导体陶瓷

对于铁电半导体陶瓷而言，其同时具有压电性和半导体特性。陶瓷是微细晶体的烧结体，它与单晶材料不同，是由晶粒及晶界构成的，正是由于陶瓷内部晶界的存在和利用，使得陶瓷半导体具有一些优于单晶半导体的特性。再者，陶瓷半导体的制造不要求像单晶半导体那样的高纯原料，而且便于大量生产，成本低，这些都是单晶半导体所不能相比的。近年来，陶瓷半导体已成为陶瓷领域内极为活跃的分支，它已和非晶态半导体、有机半导体构成了一个新的半导体家族。半导体陶瓷品种繁多，具有产业规模生产的主要有：热敏、气敏、湿敏、压敏及光敏电阻器等。

3.3.1 热敏半导体陶瓷

热敏电阻器一般可分为正温度系数（PTC），负温度系数（NTC）和临界温度电阻器（CTR）三类。PTC 热敏电阻器以 $BaTiO_3$ 或 $BaTiO_3$ 固溶体为主晶相的半导体陶瓷元件。在一定的温度范围内，其阻值随温度的增加而增加，表现出所谓的 PTC 效应。按材料居里点 Tc 可分为低温、高温，按阻值可分为低阻、高阻，按使用电压可分为低压、常压和高压，按曲线陡度可分为缓变型和开关型。

NTC 热敏电阻有 3 种不同类型的阻温特性：

（1）缓变型的热敏电阻。

（2）负温度突变型，又称临界温度系数热敏电阻（CTR），在特定温度内，其阻值急剧下降。

（3）阻温特性为直线的陶瓷热敏元件。常温（300℃）NTC 热敏陶瓷材料大多数是尖晶石型氧化物半导体陶瓷，其中包括二元系材料及多元系材料。二元系陶瓷材料主要有 $MnO—CuO—O_2$ 系、$MnO—CoO—O_2$ 系、$MnO—NiO—O_2$ 系等金属氧化物陶瓷。三元系热敏陶瓷材料主要有 Mn—Co—Ni 系、Mn—Cu—Ni 系、Mn—Cu—Co 系等含 Mn 的金属氧化物。也有不含 Mn 的 NTC 热敏陶瓷材料，如 Cu-Ni 系、Cu—Co—Ni 系等。这些氧化物按一定配比混合，经烧结后性能稳定，可在空气中直接使用。

临界温度系数热敏电阻（CRT）是一种具有开关特性的负温度系数热敏电阻。由于某些材料的转变温度较低，因此必须在低温情况下使用。如果需要转变温度较高一些的 CTR 热敏电阻，就必须掺杂一些氧化物（如 CaO、SrO、BaO、SiO_2、TiO_2 等）。利用这种热敏电阻可以制成固态无触点开关，具有广泛的应用前景。VO_2 系临界温度热敏陶瓷已应用于恒温箱温度控制、火灾报警和电路的过热保护等。从产量来看 NTC 最大，PTC 居次，CTR 最小。

3.3.2 气敏半导体陶瓷

常见的气敏半导体陶瓷材料无论是 n 型，还是 p 型，其气敏特性都是由于表面物理吸附、化学吸附或物理化学吸附引起表面能态发生改变，从而导致材料电导率的变化。气敏陶瓷可分为电导式和电话式两类。气敏材料主要有 SnO_2 系，Fe_2O_3 系，V_2O_3 系，V_2O_5 系，ZrO_2 系，NiO 系，CoO 系及稀土过度金属氧化物系，如 Ln（Ni，Co）O_3 等。SnO_2 气敏传感器至今仍是应用最广和性能最优的一种，对许多可燃气体，如氢、一氧化碳、甲烷、丙烷、乙醇、丙酮、城市煤气和天然气等都有相当高的灵敏度，并且有较高的重复性和使用寿命。选择纳米级的材料可以大幅度提高 SnO_2 气敏陶瓷传感器的气敏性能。

3.3.3 湿敏陶瓷

湿敏陶瓷是其电性质随环境温度变化相应变化的一类材料。陶瓷湿敏材料大部分是利用微孔吸附水分与晶粒表面作用而使电导发生变化制成的湿敏传感器，利用电容量变化制成的湿敏陶瓷传感器因湿敏特性曲线的非线性变化、器件不稳定和寿命短等原因，应用范围较窄。最近关于湿敏传感器方面的研究主要是对湿敏陶瓷材料进行改性和探索，诸如利用质子传导的固体电解质型温度传感器和利用热敏电阻组成的绝对湿度湿敏传感器等。常见的湿敏瓷有 $MgCr_2O_4—TiO_2$，$Si—Na_2O—V_2O_5$ 系，$ZnO—Li_2O—V_2O_5$ 系，$ZnO—Cr_2O_3$ 系，Fe_2O_3，Fe_3O_4，Ni_2O_3 等。

3.3.4 压敏半导体陶瓷

压敏电阻器是一种具有伏安特性呈非线性、对电压变化敏感特点的半导体陶瓷。压敏电阻器的非线性伏安特性是由材料的晶界效应引起的结果，可用分立的双肖特基势垒模型等理论进行解释。材料主晶相主要有 ZnO，SiC，$BaTiO_3$，Fe_2O_3，SnO_2，$SrTiO_3$ 等。其中 $BaTiO_3$，Fe_2O_3 利用的是电极与烧结体界面的非欧姆性，而 SiC，ZnO，SnO_2，$SrTiO_3$ 利用的是晶界的非欧姆特性。目前，应用最广、性能最好的是 ZnO 压敏半导体陶瓷。

3.3.5 光敏陶瓷

半导体陶瓷在光的照射下，往往会引发一些电性质的变化，由于陶瓷电特性的不同及光子能量的差异，可能产生光电导效应，也可能产生伏特效应。利用这些效应，可以制造光敏电阻和光电池。典型的产生光电导效应的光敏陶瓷有 CdS、CdSe 等。典型的产生光生伏特效应的光敏陶瓷有 $Cu_2S—CdS$、CdTe—CdS 等。$Cu_2S—CdS$ 陶瓷太阳能电池虽在转换效率方面比不上硅太阳能电池，但它的成本低，而且耐辐射能力比硅太阳能电池强。因此它适宜在空间或地面某些特殊装置中作小功率电源，尤其在我国西部地区广漠无垠的沙漠或草原上，利用其丰富的日照条件解决部分用电电源是有前途的，但是 $Cu_2S—CdS$ 陶瓷太阳能电池存在转换效率不高和易于老化的缺点，需要进一步研究解决。CdTe—CdS 陶瓷太阳能电池是一种厚膜型电池，由于采用厚膜工艺，生产过程易于自动化，成本低，是一种很有前途的陶瓷太阳能电池。

4 薄膜压电材料

20 世纪 70 年代，压电薄膜开始出现，最早的压电薄膜是通过电子束蒸发、RF 溅射、离子束方法制备出来的。在现有的压电薄膜中，比较满意和正在使用的是钛酸盐系列压电薄膜，其中最常用的就是 PZT，PZT 薄膜的各项指标良好，具有较好的压电性、铁电性、热释电性以及电光和非线性光子特性，适用于微电子学、光电子学、集成光学以及 MEMS 领域，是目前应用最为广泛的压电薄膜材料。

4.1 压电薄膜与压电半导体薄膜

为了满足压电器件、特别是高性能和超高频压电器件的要求，从 20 世纪 60 年代开始，人们就着力发展压电薄膜。最初研究的是 CdS 和 ZnS 薄膜，继而是 ZnO 薄膜。20 世纪 60 年代末期，已经扩展到研究 AlN 薄膜、$LiNbO_3$ 薄膜以

及 $PbTiO_3$、PLZT 等钛酸盐系压电铁电薄膜。稍后，又开始对结构属于 γ-Bi_3O_3 族的多种薄膜进行研究。此外，也有人开展 Ta_2O_5 薄膜和 ZnO/AlN 复合压电薄膜的研究。至今，研究比较深入的非铁电性压电薄膜主要有 ZnO 和 AlN 薄膜，此外还有 Ta_2O_5 薄膜和 ZnO/AlN 复合压电薄膜。

常见的压电薄膜制备方法分为物理沉积法和化学沉积法两大类。

物理沉积包括溅射法（sputtering）、电子束蒸发、脉冲激光沉积（PLD）、分子束外延（MBE）等。化学沉积又分为：① 气相沉积法（CVD），包括普通 CVD，金属有机化学气相沉积（MOCVD），等离子体增强 CVD 等；② 溶液沉积法，即湿化学法，包括溶胶凝胶法（sol-gel）、金属有机沉积法（MOD）、水热法等。其中磁控溅射法具有成膜均匀、致密，且制备工艺简单、成本低等优点，是一种常用的 ZnO 薄膜制备技术。

氧化锌（ZnO）是Ⅱ-Ⅳ族化合物，属于六角晶系 6mm 点群，具有纤维锌矿结构。这种结构适合于高质量的定向外延薄膜的生长，因此是一种兼有压电性、热电性、光导电性和荧光性等多功能的薄膜材料。ZnO 在常温下的禁带宽度是 3.37eV，是典型的直接带隙宽禁带 N 型半导体，其密度是 5.67g/cm，晶格常数为：$a=0.324\ 98$nm，$c=0.520\ 66$nm。在晶体结果中，每个 Zn 原子与 4 个 O 原子按四面体排布。优质的 ZnO 薄膜具有宽带隙、低介电常数、机电耦合系数大、温度稳定性好、化学性能稳定及优异的压电特性，再加上其丰富的资源、价格低廉，在许多领域有重要的应用，成为目前最具有开发潜力的薄膜材料之一。

AlN 薄膜属于Ⅲ-Ⅴ族化合物绝缘材料，具有宽能隙直接能带结构，禁带宽度 $E_g=6.2$eV。AlN 一般以六方晶系中的纤锌矿结构存在，其晶格常数 $a=0.311\ 4$nm，$c=0.4947$nm。氮化铝薄膜具有很多优异的物理化学性质，如高的击穿场强、高热导率、高电阻率、高化学和热稳定性以及良好的光学及力学性能，高质量的氮化铝薄膜还具有极高的超声传输速度、较小的声波损耗、相当大的压电耦合常数，与 Si、GaAs 相近的热膨胀系数等特点。AlN 独特的性质使它在机械、微电子、光学，以及电子元器件、声表面波器件（SAW）制造和高频宽带通信等领域有着广阔的应用前景。制备 AlN 薄膜大多采用低温（指衬底温度一般低于 500℃）成膜技术，其优点是：

（1）可用低熔点基片。

（2）与半导体工艺的相容性较好。

（3）可将声表面波器件的叉指电极放在基片和压电薄膜之间。

（4）可用来制备生体波器件。

（5）可减少薄膜中的热应力和界面密度。

AlN 薄膜和 ZnO 薄膜制备技术很相近，二者结构相同，都是纤锌矿结构型化合物，其微晶易于择优取向。但相对来说，AlN 单晶薄膜比较难以生长，其多晶薄膜较难实现择优取向，因此在生成过程中常用较高的基片温度和较低的沉积速率。此外，因为 AlN 靶很难溅射，故很少使用化合物靶，一般采用高纯 Al 靶通过反应来制备 AlN 薄膜。在反应溅射制备 AlN 薄膜时，可采用纯 N_2 气，它既作为反应气体，又作为溅射气体。同样地，也可以用纯 NH_3 气制备薄膜，但是，后一气体的放电电压较低，成膜速率很低，并常会形成微晶 C 轴平行于基片表面的 AlN 薄膜。

Ta_2O_5 薄膜。Ta_2O_5 晶体属单斜晶系，其压电性强，且其化学性质非常稳定。按结构来分，Ta_2O_5 薄膜有非晶薄膜、多晶无规取向薄膜、多晶择优趋向薄膜和单晶薄膜。前 2 种薄膜没有压电性质，而单晶薄膜和择优取向的多晶薄膜是一种优异的压电薄膜，Ta_2O_5 薄膜常采用磁控溅射技术，若在磁控溅射时不加热基片，所形成的薄膜往往是非晶 Ta_2Ox 薄膜，因此为了得到 β-Ta_2O_5 晶体薄膜，需要在溅射后对薄膜进行高温热处理，如先在 600℃纯氧中热处理 4h，然后在纯氮气中，经 1000℃处理 1h，或者直接在氧气中，用 1000℃热处理 0.5h。

ZnO/AlN 复合压电薄膜　由于压电器件越来越向高频发展，因此需要探索新型的压电薄膜。例如制备特高频声表面波器件，就需要声速高、机电耦合系数大的压电薄膜，以避免制作叉指电极的困难，为此，人们研究了 ZnO/AlN 复合压电薄膜，以利用 ZnO 薄膜的大机电耦合系数和 AlN 薄膜的高声速。这种薄膜是在玻璃基片上先沉积 AlN 压电薄膜，然后制备叉指电极，最后再沉积 ZnO 压电薄膜和短路电极。

制备复合压电薄膜的关键是各层的制备工艺必须相容。由于 AlN 压电薄膜化学性质稳定，耐腐蚀、耐高温，所以将它安排在复合结构的底层，先制备这层薄膜，在此基础上再制备其他复合结构。

4.2 铁电薄膜

具有铁电性且厚度尺寸为数十纳米到数微米的膜材料叫铁电薄膜，它具有良好的铁电性、压电性、热释电性、电光及非线性光学等特性，由于铁电薄膜体积小，成本低，性能好，可以替代单晶及多晶体材料，广泛应用于微电子学、光电子学、集成光学和微电子机械系统等领域，成为国际上新型功能材料研究的一个热点。国际上对铁电薄膜的研制开始于 20 世纪 60 年代末，随着现代科学技术的发展，特别是大规模高容量存储技术的发展，铁电薄膜的研究在 20 世纪 90 年代成为新材料研究的热点之一。铁电薄膜与半导体技术的集成形成了许多重要的铁电薄膜器件，如铁电随机存储器 FRAM。FRAM 具有无挥发性、抗辐射、低功耗、高集成度和高的读写速度而倍受人们的青睐。虽然 FRAM 早已步入了产业化阶段，但要在市场上占据绝对主导地位，还有许多问题需要解决，其中最突出的问题为材料的选择和抗疲劳研究。但是，随着铁电物理学研究的不断深入及新材料新工艺的大量涌现，加上 FRAM 本身固有的优点，FRAM 正一步步向实用化逼近。

（1）铁电薄膜研究发展迅速的主要原因：

1）电子器件小型化、微型化、集成化的要求推动了铁电薄膜的研究。

2）成本上远低于昂贵的单晶铁电材料且几何尺寸易于满足大面积或较复杂的形状。

3）新应用领域的开发（如研制微电子机械）使其能实现新的器件概念。

目前铁电薄膜的研究集中在无挥发性的记忆材料，已选择研究的材料体系有多轴向铁电材料 PZT、PLZT、PT、PLT、PBN；晶粒取向或外延的单轴铁电材料主要有铌酸钾锂 PLN、铌酸锶钡 SBN，锗酸铅 PG，氟镁酸钾 KMgF。现在 $SrBi_2Ta_2O_9$（SBT）膜的抗疲劳循环已达 10^{12} 次，达到 10^{14} 次时便可商业化。表 4.4-2 和表 4.4-3 是几种常见的铁电薄膜性能对照表。

表 4.4-2 铁电薄膜介电特性对照表

性能	材料							
	$PbTiO_3$	PLT5	PLT30	PLT15	PZT，PYZT	$BaTiO_3$	BST	Bi_4Ti_3
介电常数 ε	150	180	200	210	300	400	500	150
介电损耗 δ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.015	0.02	0.01	0.03
电阻率 ρ（Ω）	2×10^9	1×10^{10}	7×10^{10}	6×10^{20}	6×10^9	2×10^3	1×10^{30}	7×10^{36}
抗电强度 E_b（V/cm）	$>10^4$	$>10^4$	$>10^4$	$>10^4$	$>10^4$	$>10^4$	$>10^4$	$>10^4$

（2）当前铁电薄膜应用研究的热点领域。

1）非挥发性铁电随机存取存储器（FRAM）。非挥发性铁电薄膜随机存取存储器 FRAM（Ferroelectric Random Access Memories）是利用铁电材料固有的双稳态极化特性—电滞回线来制备的永久性（又称为非挥发性）存取存储器。在这种存储器中，作为数值计算基础的布尔代数中的“1”和“0”两种状态，用一个铁电薄膜电容器中自发极化“向上”和“向下”表示，即它的正负极化状态。一组这样的电容器排成矩阵就成了一个铁电非挥发性存储器。在每个铁电存储单元中含有一个晶体管和一个铁电电容（称为“1C+1T”结构）。

与其他存储器相比，非挥发性铁电薄膜存取存储器的显著特点是：非挥发性和记忆基于自发极化的取向，因而即使切断外加电源记忆也不消失；存取速度快，可达 10ns 量级（理论上可达 1ns）；能耗低，存取靠电压驱动而不是电流驱动；制备工艺基本与现有半导体工艺兼容；抗辐照损伤能力强。

表 4.4-3 铁电薄膜铁电特性对照表

性能	材料					
	$PbTiO_3$	PLT10	PZT，PYZT	$BaTiO_3$	BST	Bi_4Ti_3
剩余极化 P_r（pc/cm^2）	20	16	25	3	3	3
矫顽电场 E_c（kV/cm）	30	40	50	100	50	50

2）铁电动态随机存取存储器（DRAM）。用铁电非挥发性存取存储器取代目前广泛采用的普通动态随机存取存储器（DRAM）或磁盘，将是计算机工程技术的一大革命。当前需解决的问题是大容量 FRAM 成套技术和这种新型存储器要为半导体工业界所接受。做到这两点，尚需时日。目前，利用铁电薄膜高介电常数的特性取代现有 DRAM 中的介电材料后，大大缩小了 DRAM 中电容器的尺寸，已引起人们的广泛注意。铁电动态随机存取存储器正是在这一背景下发展起来的。

现在 DRAM 采用的介电材料为氧化硅/氮化硅/氧化硅（ONO），介电系数为 6.8～6.9，近期推出的 256MB 的 DRAM 中，电容器尺寸已减至 0.25um，已到了 ONO 材料的极限。2001 年推出的下一代 1GB DRAM 必须采用高介电常数材料。在 1GB 和 4GB 中采用的高介电系数材料是（Ba，Sr）TiO_3（BST）薄膜，介电常数为 200～800，用 BST 膜取代 ONO 膜可使 DRAM 的密度提高 50 倍左右。利用高介电常数绝缘介质材料制备的 DRAM 的结构和工作原理与传统的以 SiO_2 为介质层的 DRAM 相同。

3）薄膜型热释电红外探测器。光电子技术中的一个重要方面是光的探测，特别是红外光的探测。按原理分，红外光探测有量子型和非量子型两种。前者主要利用半导体材料，如 PbS，InSb，HgCdTe 等；后者主要利用热释电材料。与量子型红外探测器相比，热释电红外探测器具有响应光谱宽、可室温操作等优点，因而可以满足常温下对物体进行热成像的需要。铁电薄膜在红外上的应用、尤其是在军事上的应用一直受到人们的关注。相对于体材而言，薄膜型热释电红外探测器具有分辨率高、反应快、能与微电子相集成等优点，因而是制作高性能热释电红外探测器比较理想的材料，需要特别指出的是，随着集成铁电学的发展，有关薄膜型热释电红外探测器列阵的报道不断增多，这种探测器列阵可在室温下实现红外凝视成像及跟踪，这将从根本上改变目前红外光电子学的面貌。

5 压电复合材料

压电复合材料是一种多相材料，它是由压电陶瓷和高分子聚合物等材料通过复合工艺构成的一种新型材料，这种材料不仅能保持原组分的特色，通过复合效应还能使其有原组分材料所不具备的性能。复合材料的复合效应包括加和效应和乘积效应。加和效应是指复合材料组成相的单相性能通过一定的加和，构成复合材料的总体功能。乘积效应是利用复合材料两相的不同性能，通过两相的相互作用产生第 3 种性能，如现已大量生产的自控发热体，就是由颗粒导电材料和高分子材料基体复合，组成复合材料。对此材料通电，即因有电阻而发热，热又使高分子聚合物膨胀变形，从而破坏了导电体的通路，使电阻增大而降温。如此相互作用最终达到一个平衡温度。这种热/变形×变形/电阻＝热/电阻的效应完成控温的目的是乘积效应的典型例子。

压电复合材料有多种复合方式，就结构来说有混合状的、层状的、梯形和蜂窝形的。就材料来说，有 PZT/聚合物、PZT/PZT（2 种 PZT 的组分不同）、PZT（致密）/PZT（多孔）/PZT（致密）以及其他压电材料与聚合物的复合材料等。

影响压电复合材料有效性能的因素可分为两类，一类是复合材料中每一组分材料的性能，另一类是复合材料内部的微结构特征，因此根据复合的方式和组元的性能确定复合体的性能是复合材料的工艺设计及理论研究的依据。

5.1 压电复合材料的结构及复合效应

5.1.1 压电复合材料的结构

表征压电复合材料结构的主要参数有联结形式、对称性、各组分的体积分数及其形状和尺寸等。复合材料的联结型，即复合材料各组分的显微结构排列情况，首先由 Newnham 等人提出，后经 Pilgrim 修订，这是衡量压电复合材料机电性能的重要参数。它反映了各组分在三维空间自身相互联结的方式，决定了复合材料中电场、磁场和应力的分布情况，因而对性能影响很大。复合材料中，某一相被其他相所隔离，则该相称为零维的；某一相在三维空间的 1 个、2 个或 3 个方向上自我两通，则称为一维、二维和三维的。对于两相复合材料来讲共有 10 种联结型，即 0-0，0-1，0-2，0-3，1-1、1-2，1-3，2-2，2-3，3-3 型。其中，最重要的是 0-3，1-3 和 3-3 型压电复合材料。习惯上把对功能效应起主要

作用的组分放在前面，称为活性组分。例如，活性颗粒分散在连续媒质中形成0-3型联结，连续纤维分散在连续媒质中形成1-3型联结，多层薄膜则属于2-2型联结。

不同种类的压电复合材料其性能不同，同种复合材料的性能也会因内部结构的不同而有很大的差别。因此，研究复合材料的要点之一是要表征其内部结构。表征复合材料内部结构的主要参数有连通型、对称型、各相的体积占有率及其形状和尺寸等。

复合材料中各相的自我连通情况不仅与制备工艺有关，还与各相的体积占有率、形状、尺寸和取向度有关。对于由压电陶瓷颗粒与聚合物基体构成的复合材料，当陶瓷相的含量很小时，它以分散的颗粒形式均匀地分布在基体内，这时复合材料是0-3型的；当陶瓷相的体积占有率增大时，开始出现颗粒的团聚体，随着陶瓷相体积占有率增大，团聚体越来越大，到达某一临界体积占有率时，团聚体成为3维自我连通的，这一临界体积称为逾渗（Percolation）极限。若陶瓷相为导体，基体相为绝缘体，则在逾渗极限将发生绝缘体向导体的转变。复合材料在逾渗极限附近有许多特殊而有趣的性质。

复合材料的对称性指的是材料各组成相内部结构及其在空间几何配置上的对称特征，正如晶体的点群对称性决定了物理性质一样，压电复合材料的对称性决定了其物理性质的矩阵形成及所能激发的振动模式。对于由压电陶瓷颗粒与聚合物构成的0-3型复合材料，压电陶瓷颗粒均匀地分布在基体中，宏观上这一复合体是各向同性的。当一外电场加在复合体上使压电陶瓷颗粒极化后，复合体就不再是各向同性的了。极化方向（电场方向）具有无穷重旋转轴的对称性，复合体的对称性可用∞m表示。由此可知，极化后0-3复合体的物理性质矩阵与6mm点群的相同。对于由四方棱压电陶瓷平行排列于聚合物基体中形成的1-3型复合材料，极化前有4/mmm的对称性，棱柱方向与四重轴重合，极化后（设极化沿柱轴方向）则只具有4mm的对称性，与四重轴垂直的镜面m因极化而不再存在了。

5.1.2 压电复合材料的复合效应

压电复合材料具有不同于单相材料的性能，由于各相材料的空间复合，产生了3种不同的复合效应：加和性（sump property），乘积性（product property）及组合性（combinational property）。

加和性是指复合材料组成相的单相性能，通过一定的叠加，构成复合材料的总体效应。复合材料的这些性能介于其组成相的最大值与最小值之间，如压电复合材料的介电常数、密度、压电常数等。

乘积性是利用复合材料两相的不同性能，由复合材料内部两相之间的耦合而产生的第3种性能，是两组成相都不具有的性能。这是由于组成相性能的不匹配，导致不同特性之间的耦合而产生的一种新特性。例如，压电材料与磁致伸缩材料的复合材料可具有磁电效应，磁场通过磁致伸缩产生应变，后者通过压电效应改变材料的极化；无自发极化的压电材料与另一种材料复合后，可具有热释电效应，因为温度变化可由热膨胀引起应变，后者通过压电效应改变极化。

复合材料的组合性是由2个或多个具有相加性的参数组合而成的。例如，复合材料的泊松比、声速、水声探测器优值$d_e g_n$等，它们不满足相加性，其数值可低于或高于组成复合体的任一相的相应值。

5.1.3 衡量指标

压电复合材料和压电陶瓷均为电介质，介电性能对压电材料的应用有重要的影响。材料的介电性能包括：相对介电常数ε_r、介电损耗角正切值D（或$\mathrm{tg}\delta$），抗电（击穿）强度E_b以及绝缘电阻率ρ等。这些参数随不同的测试温度和测试电场频率而有所变化。

5.1.4 发展情况

PZT压电陶瓷作为很好的换能器材料已有30多年，$BaTiO_3$作为优良的高介材料几乎达40年之久。过去十几年来对一些化合物的深入研究表明，改变掺杂元素的方法不可能大幅度改进和提高材料的性能。于是人们用不均质的陶瓷材料和精确控制材料的多相性来改进单相材料的某些性能，获得性能较佳的复合材料。

复合材料的优点是在某些方面能突破原有材料的最佳性能而获得远比此为高的材料。另外，利用复合技术不仅能提高材料的压电性能、热电性能，还能提高材料的耐压性以及抗去极化性。

作为一种新型的换能器材料，压电复合材料兼具压电陶瓷和压电聚合物的优点。与传统的压电陶瓷（或单晶）相比，它具有良好的柔顺性和机械加工性能，克服了易脆和难以加工成各种形状的缺点。而且复合材料密度小、声速低，易与空气、水及生物组织实现声阻抗匹配。与聚合物压电材料相比，它具有较高的压电常数和机电耦合系数，故灵敏度高。在未来几年，它的研究主要集中在以下几个方面：

（1）解决复合材料工艺中存在的问题，如退极化，压力的不稳定性。

（2）进一步完善压电复合材料的理论模型，包括振动模式、动态特性、振动波的传播及各参数的描述等。

（3）研究复合材料的制作工艺，以提高性能，降低成本。

（4）开发压电器件，制备多功能集成器件，充分利用其优良的物理特性，如压电性、热释电性。

压电复合材料作为一种新型功能材料，经过多年的研究和开发，已成为压电材料家族中的一大系列。它优良的性能将使其继续成为今后几年的研究热点，可以预计在未来的10年，压电复合材料的研究和应用将会有更大的发展。

5.2 晶态聚合物/铁电陶瓷材料

常用的铁电复合材料的基体一般由聚合物构成，其声学阻抗低、柔顺性好。聚合物是由很多的结构单元组成，这些结构单元可以是一种（均聚物），也可以是几种（共聚物）。他们通过共价键连成不同的结构，结构单元不同，其性能完全不同，所得复合材料的性能也完全不同。聚合物分为极性和非极性两种。极性聚合物的整个大分子链或链内（如侧链、侧基）构成了不同尺寸的偶极子。即使是非极性聚合物，也难免由添加剂或杂质引入偶极子。在外电场作用下，极性高分子链内偶极基团沿外电场方向排列取向。偶极子取向的难易程度取决于聚合物内偶极运动性质：定位自由、独立运动或相关运动，后者与它所处的状态（溶液、固体）有关。

在0-3型压电复合材料中，陶瓷以颗粒分散在聚合物基体中，聚合物基体是三维相互连通的，因此聚合物的性能对复合材料的介电、压电和力学性能有影响。从已有的文献可以看出，制备压电复合材料的聚合物有：聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）、环氧树脂、硅橡胶、聚乙烯（PE）、PVDF、P（VDF-Tree）、PEEK以及尼龙等多种高分子材料。聚合物相在压电复合材料中所起到的不仅是连接相的作用，而且它的各项性能参数也直接影响复合材料的电学、力学性能，因

此聚合物基体对复合材料的介电性和压电性有一定的贡献。作为复合材料，人们大多研究了聚合物相的含量对复合材料的介电常数、密度和压电应变常数的影响。而作为声学材料，聚合物基体对复合材料的声阻抗以及压电优值等综合性能却没有系统研究。

随聚合物材料的广泛应用，聚合物结构与性能的研究获得了迅速发展，晶态聚合物的结构研究是近年来国际上比较活跃的研究领域。晶态聚合物晶体结构的研究远比低分子要困难得多，与结晶低分子比较，晶态聚合物有以下几个特点：

(1) 聚合物晶胞是一个或若干个高分子链的链段构成，除少数天然蛋白质以分子链球堆砌成晶体外，绝大多数情况下高分子链以链段排入晶胞中，这与一般低分子以原子、离子或分子作为单一结构单元排入晶格显著不同。

(2) 高分子链内以共价键连接，分子链间以 Vander-Waals 力或氢键相互作用，结晶时自由运动受阻，妨碍其规整排列，聚合物部分结晶且产生畸变晶格及缺陷。

(3) 结构的复杂性及多重性使得对聚合物结晶不仅要考虑通常低分子结晶的微观结构参数，还要考虑结晶聚合物的宏观结构参数。

5.3 非晶态聚合物/铁电陶瓷材料

近年来，由压电陶瓷与压电聚合物聚偏二氟乙烯—三氟乙烯共聚物［P（VDF-TrFE)］形成的 0-3 型新型压电复合材料越来越引起人们的兴趣。1999 年，K. L. Ng 及其合作者通过实验发现，当选择压电聚合物为基体时，极化后的压电聚合物在复合材料中也具备压电、热释电性，而且通过改变压电陶瓷与压电聚合物的极化状态，可以得到满足两种不同要求的材料：热释电性能高而压电噪声弱甚至为 0 的热释电体及压电性能强的压电体，从而引发了对该类材料的研制和理论研究。

P（VDF-TrFE）是 PVDF 的共聚物，也是半结晶体。共聚物的压电、热释电性的强弱取决于 VDF 单体含量的高低，当 VDF 的含量高于 50%mol，共聚物呈现与 PVDF 几乎相等的压电、热释电性，而且具有比 PVDF 更高的机电耦合系数，更适合用于超声换能器或压力传感器。其压电、热释电性也来源于 β 相的 PVDF。选择 P（VDF-TrFE）为基体，主要是因为由熔融法或溶液法直接可以得到具有压电、热释电性的 β 相共聚物，而 PVDF 必须拉伸才具有压电、热释电性，这不利于结构的复合。目前，对 P（VDF-TrFE）为基体的压电复合材料的研究还处于初期，关于复合过程中工艺可能给 P（VDF-TrFE）带来的影响，复合后组成相可能产生相变的改变等，还有待研究，而且能否复合成其他连通型的复合材料还未见报道，也没有一个理论从微观结构上综合考虑各组成相晶体结构可能发生的变化。预计今后几年，这方面还是研究的热点。

6 压电聚合物材料

压电聚合物是近 30 年发展起来的一类新型压电材料，由于它具有一些独特的性能，发展很快，其中最受关注的是聚偏氟乙烯（PVDF)。它成型性好 、压电性强、柔性好，特别是其声阻抗与空气、水和生物组织很接近。因此 PVDF 在许多技术领域都有适用性，特别是用它制作用于液体、生物体及气体的换能器，可获得比用其他压电材料制作的换能器好的阻抗匹配。用 PVDF 材料可制成各种换能器，如扩音器、耳机和扬声器等声换能器，用于固体、液体和气体的超声换能器，医用换能器和开关器件等。PVDF 有机压电薄膜还具有相当优良的热电性，使其在这一领域也能发挥作用。但其机电耦合系数很小，介电和机械损耗很高，温度和老化特性差，因而限制了它的发展。

6.1 晶态压电聚合物材料

许多材料专家认为：聚合物材料是最有发展前途的材料。作为电子材料，聚合物的优越特性更为突出，概括起来，可以归纳为以下几点：

(1) 从化学结构（链节结构）来说，有机聚合物分子中可以含有多种化学键、多样功能团、多个官能度（能成新键的活性点）和多种组成，因而聚合物分子可以具有多种物化功能。

(2) 从分子结构上来看，一个聚合物分子的构型可以有多种立构体，其构象可有无数异构体。

(3) 分子的聚集态（聚合物）结构有分子的键、团排列规整、对称或无序，分子的形态或为卷曲、或为折叠、或成螺旋状分布。聚合物的结构多为晶态区与非晶区共存，但有的基本上为晶态，且是双轴取向的结晶态。

由于聚合物材料具有以上结构特点，所以现在在这类材料中发现了多种“超级功能材料”，其中聚二偏氟乙烯（PVDF）就具有多种功能，例如介电、热电、压电、驻极等功能。

最初发现的具有铁电性的聚合物为晶态的聚偏氟乙烯（PVDF)。1974 年 Tamura 等首先用 Sawyer—Tower 装置测定了 PVDF 电场与电位移之间的电滞回线（D—E)，他们指出，在室温时 PVDF 的极化方向也可因电场而反转。以后他们又发现电滞回线在 T_g 下消失，因而认为是片晶在非晶相中反转造成的。但是 Furukawa 等测定了 PVDF 从 −100～20℃很宽的温度范围内的电滞回线。在室温时，剩余极化强度 P_r 为 60mC/m^2，矫顽电场 E_c 为 50MV/m。在低温时，E_c 增大很快，在玻璃化温度 T_g 以下 −60℃时 E_c 高达 120MV/m，而 Tamura 等的实验只有 70MV/m ，所以观测不到 Tg 以下电滞回线，由此可知偶极子在电场下的转向是发生在片晶之中的。与 PVDF 同类的聚合物还有偏氟乙烯/三氟乙烯共聚物（PVDF/TrFE)、聚氟乙烯（PVF）及聚氯乙烯（PVC)。这类高分子往往由于具有相对稳定的单向螺旋，因而具备构象的特异性。

1988 年 Ikeda 以偏氰基乙烯/醋酸乙烯酯共聚物 P（VDCN—VAc）为研究对象，通过其在温度下的二次电谐波实验，证实了它具有铁电性，其结构式如下：

$$-[CH_2-C(CN)_2-CH_2-CH(OCOCH_3O]_n-$$

因其具有很强的偶极性的—CN 基团，并在主链中形成偶极构造，因此在极化后表现出自发极化现象。在晶区中相互独立的扭结链被偶极矩并排相连，形成单向有序的螺旋，是具有铁电性的根源。在高分子旋光能力方面，由单向螺旋链形成的不对称构象对旋光性的贡献远比由构型不对称所产生的旋光性来得大，这在许多旋光性高分子的有关实验中已得到了证实。

聚酰胺类晶态压电聚合物材料，由于聚酰胺中的极性键只有酰胺键，所以随着脂肪酸中的碳原子数目的增加，极性基团的分布密度相应下降，P_r 也减小。当分子链采取全反式结构，且链中的酰胺键平行排列时，这样的链可以被分子内的氢键所固定。在晶体中形成氢键片层时，聚合物有自发极化性能，从而具有铁电性，经淬火的低结晶度聚酰胺或非结晶聚酰胺的 P_r 为（26～38）mC/m^2。这表明不但晶相中

的酰胺键起作用，而且非晶相中酰胺键的有序排列对聚酰胺的铁电性也作了贡献。

具有铁电性的旋光性聚合物主要有生物聚合物及合成多肽等，如角朊、聚-γ取代-L-谷氨酸盐、聚-β取代-L-天冬氨酸盐等，也有像等规聚环氧丙烷这类聚合物，它们不仅具有构型上的不对称性，而且由于主链中的偶极肽键与轴同向排列，可以形成单向螺旋。螺旋分子中存在着大量的可极化基团，具有一定的自发极化能力，因而从结构上而言，生物高分子具有一定的铁电性。生物高分子广泛存在于自然界中，对它们进一步研究是十分必要的，但此类高分子由于要在外电场的作用下才能产生自发极化现象，且自发极化率较小，所以对它们的铁电性应用研究得不多，而其压电和热电性能非常明显，并得到了应用，如可用作生物传感器等。

6.2 非晶态压电聚合物材料

非晶态压电共聚物的典型代表是亚乙烯基二氰/醋酸乙烯共聚物P（VDCN—VAC）。亚乙烯基二氰是一种氰基聚合物，其中的氰基C—CN具有很大的偶极矩。这是由于氰基中的碳原子和氮原子，其共价键由近似的对角SP杂化轨道构成。由共价键构成的偶极子，主要是由以氮原子为中心的未配对（lone-pair）轨道电子组成，方向在碳、氮原子连线上，由氮原子指向碳原子。氰基C—CN就像是由圆筒状π电子云环绕的圆柱，大小为3.5D的偶极子就位于柱轴上。

尽管氰基具有很大的偶极子，到目前为止，尚未在纯亚乙烯基二氰聚合物中观测到任何压电或铁电效应。亚乙烯基二氰只有在与其他乙烯基酯类化合物形成共聚物后，才具有压电效应。核磁共振谱和X射线衍射研究表明：亚乙烯基二氰与醋酸乙烯形成的共聚物，具有无规立构结构，是一种亚晶体。但是，在玻璃化转变温度T_g以下，氰基C—CN中偶极矩间的强烈交互作用，使得链状分子有可能因聚集而形成弱有序。这种弱有序有助于形成偶极子的协同运动，并造成宏观剩余极化。Miyata首先在极化后的P（VDCN-VAC）共聚物中观测到较强的压电效应，此效应不仅在T_g温度（180℃）以下都是稳定的，而且其应变压电常数量d_{31}数值比PVDF高一个数量级，亚乙烯基二氰共聚物的另外一个引人注目的特点是，其介电强度>100，属于聚合物中的最大值之一。Furukawa等人的研究结果表明，此类共聚物的高介电弛豫强度与共聚物中10个或更多的CN偶极子的协同运动有直接关系。P（VDCN—VAC）共聚物的另一反常特点是其中的CN偶极子在T_g温度下仍可进行转动，并导致压电系数的极性随外加电场变化而反转。然而，到目前为止尚无充分证据证明P（VDCN—VAC）共聚物具有铁电效应。

第 5 章 焊 料

焊料是钎焊用材料，已有 4000 余年的使用历史，其熔点比被焊母材低。钎焊过程中将焊料加热到高于焊料熔点但低于母材熔点的温度，焊料熔化后填充接头间隙并与母材发生冶金作用，从而实现材料的连接。用焊料焊接材料具有灵活、简单、不需大的设备投资等优点，在电气工程材料领域占据极为重要的地位。

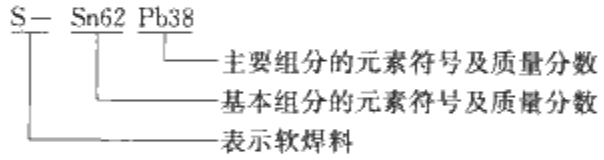
焊料的种类较多，根据熔点可分为软焊料和硬焊料两大类。通常将熔点低于 450℃的焊料称为软焊料，而熔点高于 450℃的焊料称为硬焊料。电气工程用的软焊料包括锡铅、锡基无铅、金基、铟基、铋基和锌基焊料等，而所用的硬焊料包括银基和铜基焊料等。

1 焊料的型号和牌号的表示方法

1.1 焊料的型号

GB/T 6208—1995《焊料型号表示方法》规定，焊料的型号由两部分构成：第一部分用大写字母来表示焊料的类型，“S”表示软焊料，“B”表示硬焊料；第二部分由合金主元素符号和质量分数构成，且每个型号最多只能标出 6 个元素符号。

型号表示方法及示例如下：



1.2 焊料的牌号

原机械工业部编写的《焊接材料产品样本》规定，焊料牌号由 3 部分构成：

（1）字母“HL”表示焊料。

（2）牌号的第 1 位数字表示焊料的化学组成类型，见表 4.5-1。

（3）牌号的第 2、3 位数字表示同一类焊料的不同牌号。

牌号表示方法示例如下：

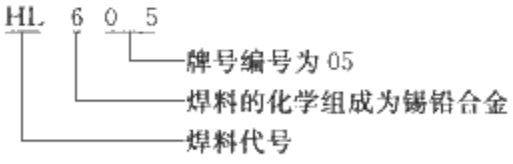


表 4.5-1 焊料牌号中第 1 位数字的含义

牌号	化学组成类型	牌号	化学组成类型
HL1××	铜锌合金	HL5××	锌合金
HL2××	铜磷合金	HL6××	锡铅合金
HL3××	银合金	HL7××	镍基合金
HL4××	铝合金		

2 焊料的选用原则

焊料的种类较多，其选用主要遵循以下原则：

（1）主成分尽量与母材主成分相同。焊料的成分与母材相同，钎焊时具有良好的润湿性。

（2）熔点合适。即焊料的液相线温度要低于母材固相线温度至少 40～50℃。

（3）焊料中的某一重要组元应能与母材产生液态互溶，从而能形成牢固的结合。但焊料与母材间的相互作用应尽可能避免形成脆性金属间化合物，避免因母材的过分溶解而导致溶蚀。

（4）焊料与母材的主成分在元素周期表中的位置应尽量靠近。这样的焊料引起的电化学腐蚀较小，即接头的抗腐蚀性好。

（5）焊料与母材间的热膨胀系数要匹配。如果二者的热膨胀系数相差较大，则焊料与母材的界面处将形成残余应力集中，严重弱化焊点的热疲劳性能。

（6）焊料与钎焊方法相匹配。不同的钎焊方法对焊料的要求不同，如真空钎焊时，焊料中应不含有蒸汽压高的合金元素，以避免污染真空系统。

（7）在钎焊温度下，焊料的主要成分应具有较高的化学稳定性。即焊料应具有较低的蒸汽压和低的氧化性，以免钎焊过程中焊料成分发生改变。

（8）满足使用要求。即获得的钎焊接头的力学性能（强度、塑性等）和物理化学性能（导电、导热、抗氧化和耐腐蚀等）能满足被焊件的工作状态要求。

（9）生产成本低。

3 电气工程常用焊料

3.1 锡铅焊料

锡铅焊料熔点低，耐腐蚀性好，对铜、铜合金和钢润湿性好，已广泛应用于电气零部件、元件及引线连接以及普通端子和印刷电路板的连接等方面。虽然无铅封装和组装已经是大势所趋，但在一些特定领域尚没有开发出合适的无铅焊料，如服务器、存储器、微处理器以及针型压接连接器等方面使用的高熔点、高铅含量的锡铅焊料无法用无铅焊料进行替代，因而，锡铅焊料的使用量虽然在逐年递减，但目前仍有较大的应用价值和使用范围。

锡铅合金共晶成分中铅的质量分数为38.1%，共晶温度为 183℃，图 4.5-1 为 Sn—Pb 二元合金相图。表 4.5-2 列

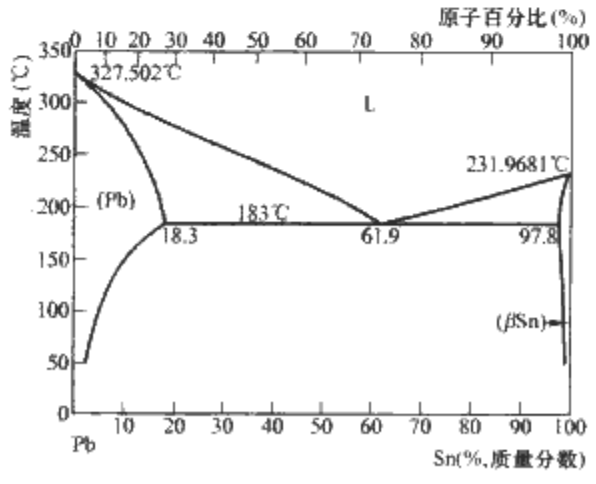


图 4.5-1 Sn—Pb 二元合金相图

表 4.5-2 Sn—Pb 焊料的化学成分及性能

化学成分（质量分数）(%)		密度 (g/cm^3)	熔化温度 (℃)		抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}℃^{-1}$)
Pb	Sn		固相线	液相线				
0	100	7.31	232	232	19	43	12.85	22.4
10	余量	7.57	183	220	43	25	—	26.0
20	余量	7.87	183	208	45	22	—	—
25	余量	8.02	183	196	44	22	—	—
38	余量	8.35	183	183	41	34	14.13	24.7
50	余量	8.87	183	209	36	32	15.82	—
60	余量	9.31	183	235	32	63	17.07	25.0
67	余量	9.61	183	250	32	66	—	—
70	余量	9.69	183	256	33	58	—	—
75	余量	9.94	183	265	28	52.1	—	—
80	余量	10.20	183	277	28	67	20.50	26.5
82	余量	10.20	183	277	28	67	—	26.0
85	余量	10.30	225	287	24	41	—	—
90	余量	10.80	265	302	22	32	—	24.6
95	余量	11.00	300	314	—	21	—	—
100	0	11.40	327	327	11	45	20.00	29.5

出了常用锡铅焊料的化学成分和部分物理、力学性能。根据接头或焊点的电气性能、力学性能要求，工作温度在150℃以下的应选用高锡的锡铅焊料，工作温度在200℃以上的可选用高铅焊料。钎焊通信电缆用铅被覆护套时，为使作业时间充裕，应使用35%～40%Sn的锡铅焊料；电器接线用的软焊料，要求焊点隆起，应选用50%Sn左右的焊料。

图4.5-2给出了锡铅焊料的密度、电导率、热导率、抗拉强度、抗剪强度和延伸率等性能随铅含量的变化。由图可见，铅含量增加，锡铅焊料的密度增大，而热导率和电导率却迅速降低。强度和延伸率均出现峰值，强度的峰值出现在铅含量为20%左右时，延伸率峰值出现在铅含量为67%和80%左右。

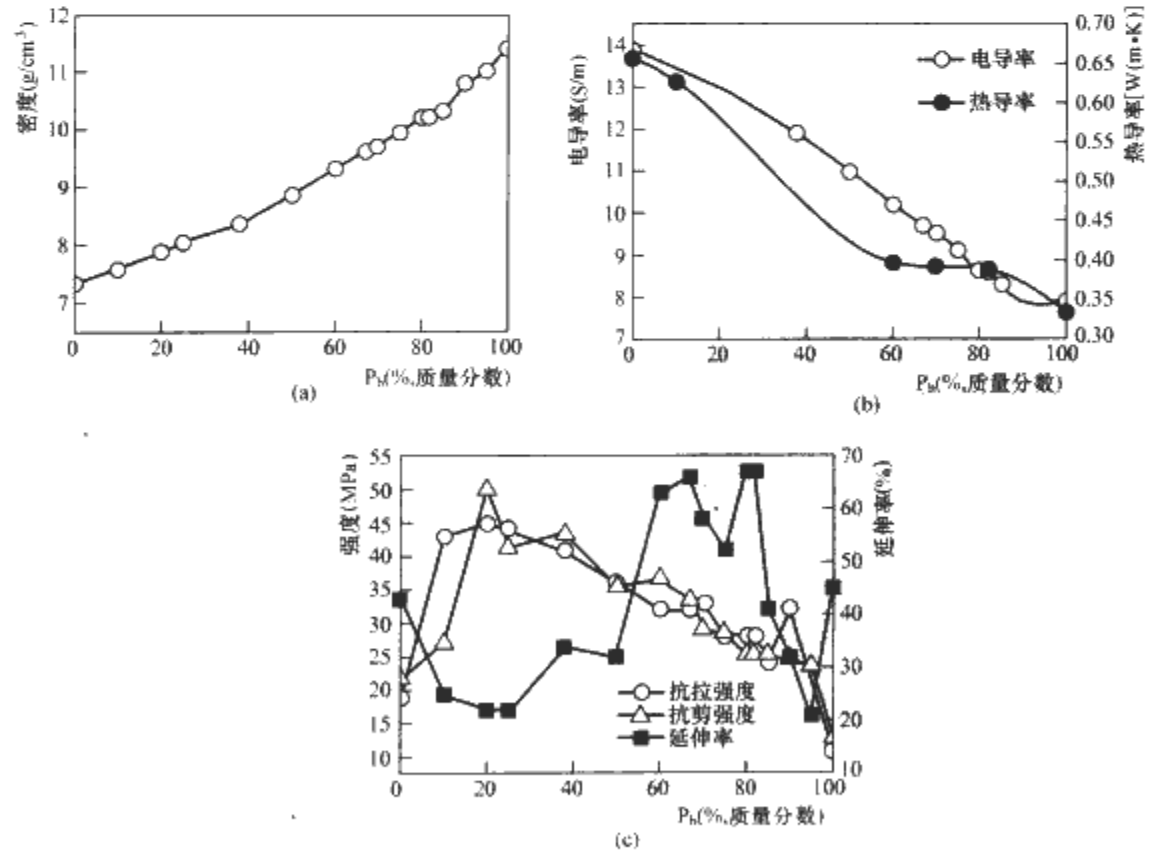


图4.5-2 Sn—Pb焊料的物理、力学性能
(a) 密度；(b) 电导率；(c) 力学性能

锡铅焊料中加入锑，可提高焊料的抗氧化性，并提高接头热稳定性能；加入银，则可细化晶粒并提高耐蚀性。表 4.5-3 为添加微量合金元素的锡铅焊料的化学成分、性能和应用领域。

采用 Sn-Pb 焊料钎焊不同母材时的接头强度见表 4.5-4。表 4.5-5～表 4.5-7 分别列出了 Sn—Pb 焊料在不同工作温度下的力学性能。

表 4.5-3　　Sn—Pb 焊料添加微量合金元素后的性能

型　号	化学成分①（%）			密度（g/cm³）	熔　点（℃）	抗拉强度（MPa）	延伸率（%）	电阻率（μΩ·m）	特点及应用
	Pb	其他	Sn						
S—Sn60Pb39Sb1	39	Sb：1	余量	8.5	183～185	46	34	0.145	熔点低，流动性好。用于钎焊工作温度较低及要求钎缝光洁的零件，如无线电零件、电气开关、计算机零件、易熔金属制品及热处理件等
S—Pb80Sn18Sb2	余量	Sb：2	18	10.23	183～277	27	67	0.220	熔点高，凝固区间大。用烙铁进行钎焊比较困难，力学性能较差，主要用于钎焊铜及铜合金和镀锌铁皮等强度要求不高的零件
S—Pb68Sn30Sb2	余量	Sb：2	30	9.69	183～256	32	—	0.182	润湿性和力学性能较好，常用于钎焊铜、黄铜、铁、镀锌铁皮等，如散热器、仪表、无线电元件、电缆护套等产品，应用较广
S—Pb58Sn40Sb2	余量	Sb：2	40	9.31	183～235	37	63	0.170	熔点低，润湿性好，可得到较光洁的表面，力学性能较好。常用于钎焊铜及铜合金、钢、锌制零件，如散热器、无线电及电气开关设备、仪表等，是应用最广的锡铅焊料
S—Sn89.9Pb10Sb0.1	10	Sb：0.1	余量	—	183～222	42	25	0.120	铅含量低，适宜于钎焊食品器皿及医疗器材等
S—Pb92Sn5.5Ag2.5	余量	Ag：2.5	5.5	—	295～305	34	—	—	高温强度较高，用于铜及铜合金和钢的烙铁钎焊及火焰钎焊
S—Sn60Pb39.2	39.2	Sb：0.8	60	—	183～185	46	—	—	力学性能和熔化温度与 S-Sn60Pb39Sb1 相近
S—Sn50Pb49.2Sb0.8	余量	Sb：0.8	50	—	183～210	37	32	0.156	常用于钎焊铜、黄铜、镀锌或镀锌锡铁皮等，可钎焊散热器、计算机零件和发动机过滤器等
S—Pb94Sn1.5Ag5.5	余量	Ag：5.5	1.5	—	302～304	—	—	—	熔点高，凝固区间小。用于钎焊钣金件和热交换器等高温工作的产品
S—Pb97.5SnAg1.5	余量	Ag：1.5	1	—	309	—	—	—	共晶型焊料，熔点高。用于钎焊钣金件和热交换器等高温工作的产品
S—Pb90Sn8Ag2	余量	Ag：2	8	—	285～295	34	67	0.216	熔点高，凝固区间小。用于钎焊钣金件和热交换器等高温工作的产品

① 质量分数。

表 4.5-4　　锡铅焊料钎焊接头的力学性能

型　号	焊料强度（MPa）	母　材	接头强度（MPa）	
			抗拉强度	剪切强度
S—Sn60Pb39Sb1	46	纯铜	93	34
		黄铜	78	34
		钢	96	35
S—Pb80Sn18Sb2	27	纯铜	84	37
		黄铜	92	37
		低碳钢	102.8	49.9
		镀锌铁皮	—	42.1
		镀锡铁皮	—	46.0
		1Cr18Ni9Ti	—	21.5

续表

型 号	焊料强度（MPa）	母 材	接头强度（MPa）	
			抗拉强度	剪切强度
S—Pb68Sn30Sb2	32	纯铜	76	36
		黄铜	86	37
		低碳钢	112	49.0
		镀锌铁皮	—	41.1
		镀锡铁皮	—	35.2
		1Cr18Ni9Ti	—	32.3
S—Pb58Sn40Sb2	37	纯铜	76	36
		黄铜	78	45
		低碳钢	112	59
		镀锌铁皮	—	55
		镀锡铁皮	—	48
		1Cr18Ni9Ti	—	31
S—Sn90Pb10	42	纯铜	88	45
		黄铜	89	44
		1Cr18Ni9Ti	—	32.3
S—Sn60Pb40	46	纯铜	93	34
		黄铜	78	34
		钢	96	35
S—Pb93Sn5Ag2	34	纯铜	54	36
		黄铜	87	39
S—Sn50Pb50	37	—	—	—

表 4.5-5　　锡铅焊料在 150℃ 时的性能

Sn 含量（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）
5	10	35
10	13	70
20	13	120
30	13	140
40	13	140
50	13	145
60	12	150

表 4.5-6　　锡铅焊料的低温性能

锡含量（%）	试验温度（℃）	抗拉强度（MPa）	抗剪强度（MPa）	伸长率（%）
10	−73	41	31	34
20	−73	48	37	32
40	−73	48	40	43
60	−73	59	54	48
10	−196	59	43	27
20	−196	85	58	30
40	−196	87	77	30
60	−196	130	110	10

表 4.5-7　　锡铅焊料的蠕变应力—寿命

续表

化学成分①（%）			寿命为 1000h 时的起始蠕变应力(MPa)	
Sn	Pb	其他	20℃	100℃
10	90	—	35	1.1
40	60	—	21	4.2
60	40	—	29	4.5
62	36	Ag：2	—	27.0
40	58	Sb：2	49	5.9
5	93.5	Ag：1.5	16	—
1	97.5	Ag：1.5	19.5	—

① 质量分数。

3.2 锡基无铅软焊料

铅及其化合物是有毒物质，损害人类健康，污染环境。随着人类环保意识的增强，世界各国已相继出台一系列法令和法规来防治电子产品所带来的生态问题，限制铅在电子产品中的使用，其中最有影响力的是欧盟于 2003 年颁布的 WEEE 指令（《报废电子电器设备指令》）和 ROHS 指令（《电器和电子设备中限制使用某些有害物质指令》），执行日期是 2006 年 7 月 1 日。我国于 2006 年 2 月也颁布了相应的《电子信息产品污染控制管理办法》，规定 2007 年 3 月 1 日起开始实施。欧盟和我国的指令都明确规定在指定日期前停止在监管电子产品中使用含铅材料。

目前已开发出的无铅焊料主要有 Sn—Ag 系，Sn—Cu 系，Sn—Zn 系和 Sn—Ag—Cu 系等，并通过添加 P、Ni、Ag、Sb、Cu、In、Bi 等元素获得不同性能的系列产品。如千住金属工业株式会社的 JS3027441 专利、亚通电子有限公司的 ZL03129619.X 专利和艾奥瓦州立大学的 US5527628 专利，分别公开了各自的 Sn—Ag—Cu 系无铅焊料；AIM 的 US5525577 专利和 US5352407 专利，公开了 Sn—Ag—Cu—Sb 系无铅焊料；松下电器产业株式会社的 CN1087994C 专利和北京工业大学的 CN1586793A 专利申请公开了各自开发的 Sn—Zn 系无铅焊料；千住金属工业株式会社的 CN1496780A 专利申请公开了 Sn—Cu 系无铅焊料；

韩国三星电机株式会社的 CN1040302C、CN1040303C 专利和 CN1139607A 专利申请公开了 Sn—Bi 系无铅焊料等。

目前尚无统一的无铅焊料标准，ISO 9453 国际标准、JIS—Z—3282 标准、欧盟 ROHS 指令以及我国正在制订的无铅焊料标准都明确规定，只要产品中的铅含量＜0.1 wt%，即可认为该产品就是无铅的。

3.2.1 Sn—Cu 系

图 4.5-3 为 Sn—Cu 合金相图，共晶点成分 Cu 质量分数为 0.7%，共晶温度为 227℃，室温下生成（Sn）和 Cu_6Sn_5 共晶组织，见图 4.5-4，其性能见表 4.5-8。Cu_6Sn_5 金属间化合物的热稳定性相对较差，极易发生粗化，因而 Sn-Cu 焊料的强度和塑性都相对较低。

表 4.5-8 Sn—0.7 焊料的性能

焊料合金	拉伸强度（MPa）	伸长率（%）	熔点（℃）	润湿时间（s）
Sn-0.7Cu	38..4	23.6	227	2.3

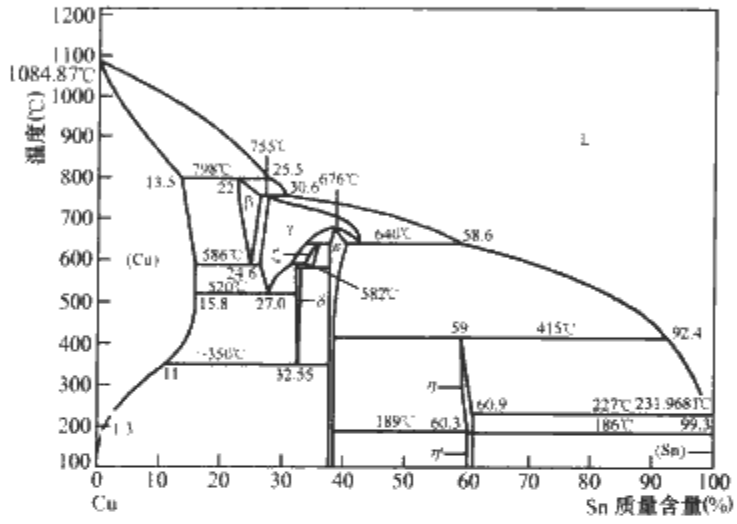


图 4.5-3 Sn—Cu 二元合金相图

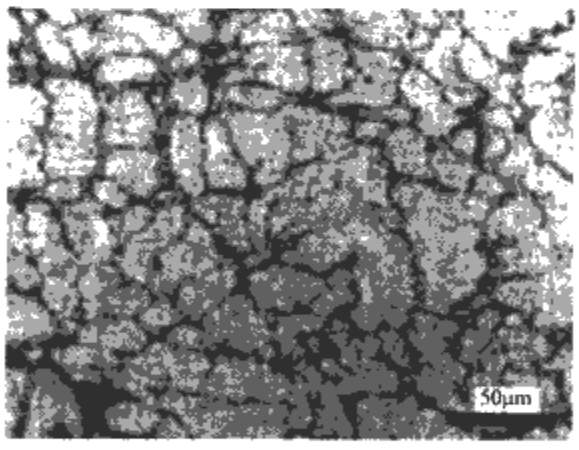


图 4.5-4 Sn—0.7Cu 焊料微观组织

Sn—0.7Cu 焊料的力学性能比 Sn—37Pb 焊料差，润湿性也远低于 Sn—37Pb 焊料，故早期没有用做焊料。随着欧盟指令的出台和无铅化的深入推广，人们又重新审视 Sn—0.7Cu 合金作为焊料使用的可靠性，特别是作为波峰焊和浸焊用焊料，并通过添加微量 Ni、P、Ge、Sb、Bi 和稀土等元素，来改善 Sn—0.7Cu 焊料合金的微观结构，进而提高其物理和力学性能。

添加微量的 Ni 可细化 Sn—Cu 合金内的 Cu_6Sn_5 金属间化合物，从而可显著提高焊料的塑性，并少量提高焊料的润湿性；加入 Ag 可改善焊料的润湿性和力学性能，并能有效地降低焊料合金的熔点；加入 P、Ga、Ge、Sb 等元素可提高焊料的抗氧化性能，减少残渣的产生，从而节约生产成本和提高焊接性；微量的 Sb 还可提高焊料的强度和高温耐疲劳性能；添加稀土元素可以细化晶粒、抑制组织粗化和提高焊料的抗蠕变疲劳性能。Sn—Cu 系无铅焊料的化学成分和主要性能见表 4.5-9。

表 4.5-9 Sn—Cu 系无铅焊料的化学成分和熔点

化学成分①（%）					熔化温度（℃）	
Cu	Ag	In	其他	Sn	固相线	液相线
0.2	—	—	Zn：2；Te：0.8	余量	226	228
0.3	—	—	—	余量	227	230
0.5	—	6	Ga：0.5	余量	210	215
0.6	—	—	Ni：0.2	余量	227	231
0.7	—	—	—	余量	227	227
0.7	—	—	Ni：0.05—0.1 P：0.005—0.05 Ce：0.01—0.1	余量	227	228
1	—	—	—	余量	227	240
3	—	—	—	余量	227	275
3	0.1	—	Bi：1	余量	215	238
3	0.6	—	Sb：1	余量	221	231
4.5	0.5	—	—	余量	226	360

① 质量分数。

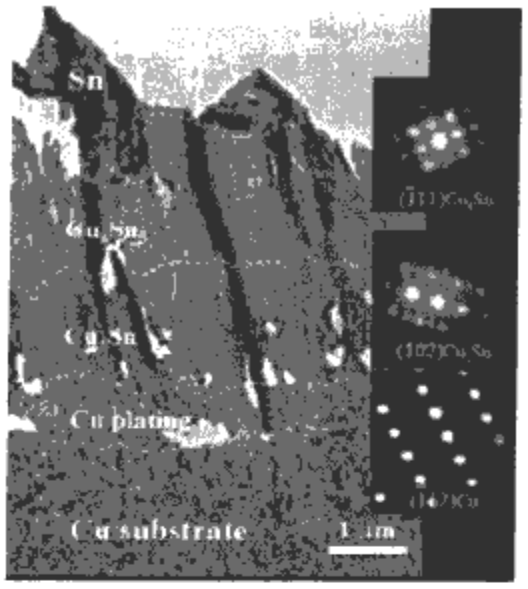
焊接过程中，熔融的锡铜焊料与被焊 Cu 基体在界面处首先进行元素间的扩散，焊料中的 Sn 元素向 Cu 内扩散，而 Cu 由 Cu 基体向焊料中扩散，并在界面发生冶金反应，形成金属间化合物层，金属间化合物层的形成是保证焊料和被焊母材实现良好连接的重要前提。界面不同区域的 TEM 衍射花样研究结果表明，界面由 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 两种金属间化合物层所构成，Cu_6Sn_5 层邻近焊料一侧，Cu_3Sn 层介于 Cu 和 Cu_6Sn_5 层之间，见图 4.5-5。Cu_3Sn 会造成不润湿现象、脆化焊点界面，从而严重恶化焊点的可靠性。此现象一般出现于焊接温度过高，或焊接时间过长的工艺中，通过优化焊接工艺可避免 Cu_3Sn 的形成。Cu_6Sn_5 层的强度较高，是焊点具有良好力学性能和电性能的保证。Cu_6Sn_5 层过薄，容易形成冷焊点；Cu_6Sn_5 层过厚，容易在热冲击下于界面附近形成微裂纹（见图 4.5-6）和脆化界面，从而弱化焊点的可靠性，适宜的 Cu_6Sn_5 层厚度为 1mm 左右。

被焊母材表面有 Ni 镀层时，界面形成 Ni3Sn4 金属间化合物层，见图 4.5-7。

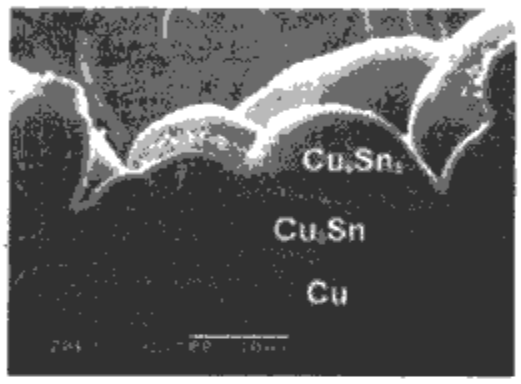
焊接过程中采用氮气等惰性气体保护，可显著提高 Sn—0.7Cu 焊料的润湿性和流动性，当润湿时间由 2.3s 下降到 0.17～0.23s，此时焊点的光亮度和润湿性接近 Sn—37Pb 焊料的效果。

Sn—0.7Cu 焊料用作波峰焊焊料时具有两个显著优点：①价格便宜，与 Sn—37Pb 焊料相比，金属成本仅增加约 23%；②由于 Sn 中熔入了少量的 Cu，可大大抑制焊料在工作时对 PCB 焊盘上 Cu 层和 Cu 引脚的浸蚀，传统的 Sn—Pb 焊料中，长期的 Cu 浸蚀会导致焊料熔点升高、润湿性下降、力学性能恶化，Sn—0.7Cu 焊料中由于已经存在少量的 Cu，可以抑制 Cu 在熔融锡液中的浸蚀速度，因此可以显著提高 Sn—0.7Cu 焊料的稳定性。

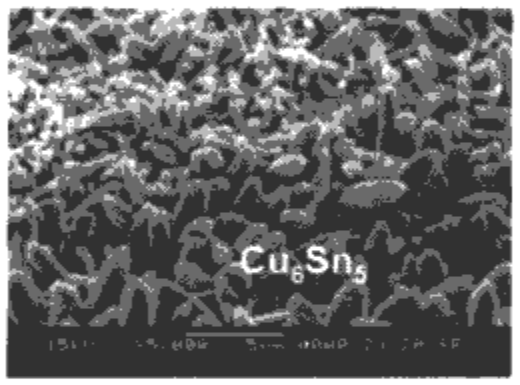
Sn—Cu 系焊料的优点是成本较低，略高于传统的 Sn—Pb 焊料；但其缺点是熔点偏高，润湿性较差，其在 260℃下在纯铜板上的扩展率约为 73%。Sn—Cu 系无铅焊料的代表产品是 Sn—0.7Cu，该产品成本低，物理、力学性能能满足波峰焊、浸焊和手工烙铁焊工艺，是目前使用量最大的无铅焊料品种之一。



(a)



(b)



(c)

图 4.5-5 Sn—Cu/Cu 焊点界面微观形貌
(a) 界面不同区域 TEM 衍射花样；
(b) 界面金属间化合物层；
(c) Cu_6Sn_5 微观形貌

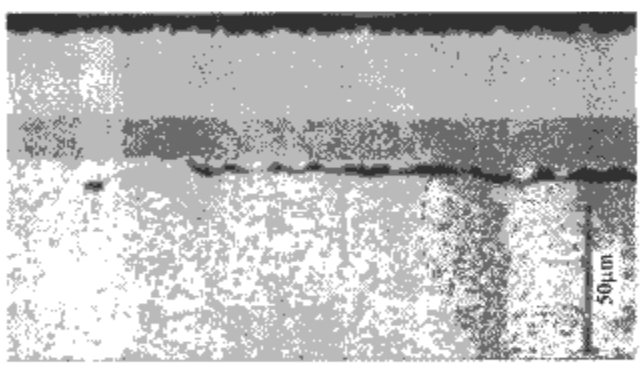
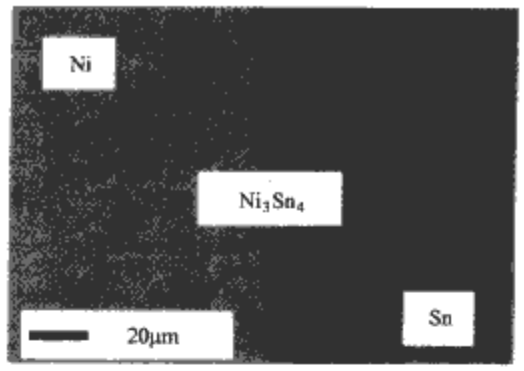


图 4.5-6 金属间化合物层过厚所导致的微裂纹

3.2.2 Sn—Ag 系

Sn—Ag 合金，共晶点成分 Ag 质量分数为 3.5%，共晶温度为 221℃，室温下生成（Sn）和 Ag_3Sn 共晶组织，图 4.5-8 为 Sn—Ag 二元合金相图。Sn—Ag 合金是人们早已熟悉的高温焊料，它比 Sn—Cu 焊接性能好，早期用在厚膜技术中，曾在 20 世纪 80 年代初用在双面再流焊的第一面再流工艺上。但由于焊接温度较高，早期未能获得广泛应用。近几年，随着欧盟指令的出台和无铅焊料的深入推广，促使人



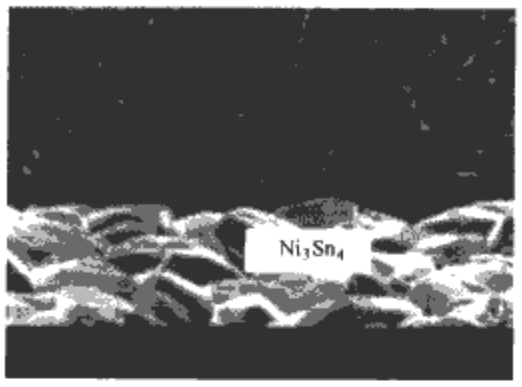


图 4.5-7 Sn—Cu/Ni/Cu 焊点界面微观形貌

们又重新认识和研究 Sn—Ag 合金，并通过添加微量合金元素，进一步提高它的综合性能。

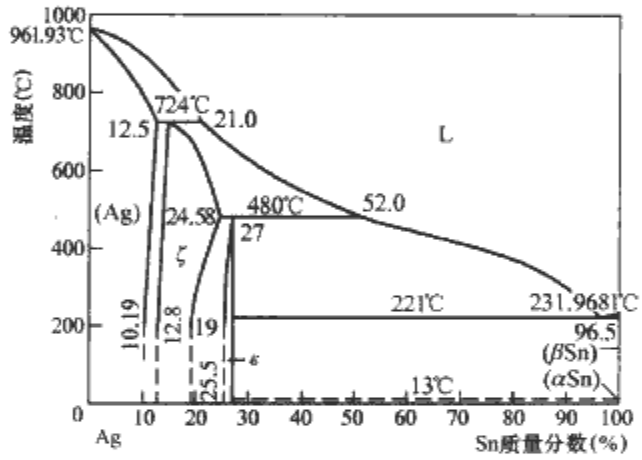


图 4.5-8 Sn—Ag 二元合金相图

Sn—Ag 系焊料组织微细，具有优良的机械性能和较高的可靠性，该系焊料以 Sn—3.5Ag 共晶合金为主，有着多年的实际使用经验，风险较小，其作为 Sn—Pb 焊料的替代合金已被业界所接受，表 4.5-10 为 Sn—3.5Ag 焊料的物理、力学性能。Sn—Ag 系无铅焊料的化学成分和熔点见表 4.5-11。

表 4.5-10 Sn-3.5Ag 焊料的物理、力学性能

焊 料 合 金	Sn-3.5Ag
密度（g/cm^3）	7.42
硬度（HV）	16.5
拉伸强度（MPa）	54.6
剪切强度（MPa）	37.8
伸长率（%）	22.5
热膨胀系数（$10^{-6}K^{-1}$）	30.2
电阻率（$\mu\Omega \cdot cm$）	12.7
杨氏模量（GPa）	55
润湿时间（s）	1.9
熔点（℃）	221

表 4.5-11 Sn—Ag 系无铅焊料的化学成分和熔点

化学成分①（%）						熔化温度（℃）	
Ag	Sb	Bi	In	其他	Sn	固相线	液相线
1	1	—	—	—	余量	222	232
1	1	—	—	Zn：1	余量	221	225
2	—	—	—	—	余量	221	225
3	—	—	—	—	余量	221	230
3.3	—	—	4.7	—	余量	210	215
3.4	—	4.8	—	—	余量	211	216
3.4	—	—	2.91	—	余量	214	216
3.47	—	—	0.99	—	余量	219	223
3.5	—	—	—	—	余量	221	221
3.5	—	—	1.5	—	余量	214	220
3.5	—	3	—	—	余量	206	213
4	—	—	—	—	余量	221	228
4	7	—	—	—	余量	—	230
4	7	—	—	Zn：1	余量	—	—

① 质量分数。

图 4.5-9 为锡银共晶焊料微观组织的照片，图中的灰色组织为（Sn），（Sn）周围弥散分布着 Ag_3Sn 金属间化合物，起到沉淀强化的作用。Ag_3Sn 呈纤维状，图中的粒子仅仅是其截面的形貌。Ag_3Sn 能均匀地分散在母相 Sn 中，并与 Sn 母相呈特定的方位关系，构成环状结构，两者在界面处有良好的结晶匹配性。Ag_3Sn 的热稳定性非常好，一旦形成，在热作用下不易发生粗化，因而 Sn-Ag 系焊料具有优良的耐热性能。

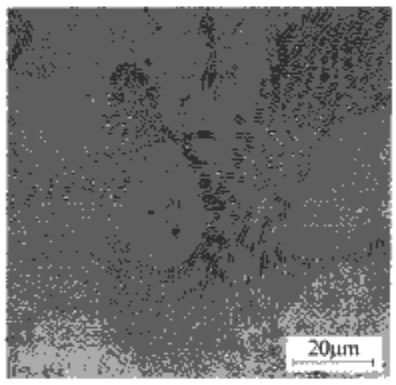


图 4.5-9 Sn—3.5Ag 焊料微观组织

焊料中 Ag 含量增大时，焊料内的 Ag_3Sn 生成量增加，焊料的强度逐步上升；Ag 含量增至 3.5%共晶成分时，焊料的强度最大；超过 3.5%Ag 时，合金内形成过共晶组织，生成粗大的 Ag_3Sn 相，导致焊料的力学性能明显恶化，焊点龟裂倾向增大，可靠性降低。Sn—Ag 系焊料钎焊后在界面处会形成较厚的 Cu_6Sn_5 层，固相反应时还会形成较厚的 Cu_3Sn 层。

在 Sn—Ag 合金中添加 Zn，可提高焊料的强度和抗蠕变性能，但 Zn 易氧化，容易导致焊料表面形成坚固的氧化膜，降低焊料的润湿性。

加入 Bi 可降低焊料的熔点，改善润湿性和铺展能力，但提高幅度较小。但 Bi 加入后，焊料的强度增加，塑性大幅降低，机械加工性能较差。

添加 In 有助于降低焊料的熔点，而不影响焊料的力学性能，In 含量为 3%时，焊料的蠕变特性最佳。虽然在无铅焊料替代合金的选择中添加 In 元素是十分有效的，但 In 是贵金属，资源也有限，添加 In 后的焊料不仅成本非常高，而且面临原材料的供应问题。

加入 Cu 有助于降低焊料熔点，改善润湿性，提高焊点的可靠性，并能有效地降低波峰焊焊接过程中焊料对元器件 Cu 引脚和 PCB 上 Cu 层的溶蚀程度，这一研究结果为无铅焊料整体性能的提高，走向实用化起到关键性的作用。

Sn—Ag 系焊料虽然润湿性和力学性能较好，但贵金属 Ag 含量较高，因而相对成本较高，价格贵，目前主要用于再流焊工艺上。

3.2.3 Sn—Ag—Cu 系

Sn—Ag—Cu 系焊料是在 Sn—Ag 焊料的基础上加入 Cu 而成，因其具有熔点低、润湿性相对较高和综合力学性能优良等优点，被公认为是目前综合性能最佳、应用最广的无铅焊料合金。图 4.5-10 为 Sn—Ag—Cu 三元合金富 Sn 侧的等温线投影图，其共晶成分是 Sn-3.8Ag-0.7Cu，共晶温度为 217℃，共晶组织为（Sn）+Cu_6Sn_5+Ag_3Sn，见图 4.5-11，图中白色基体为 β-Sn，黑色粒子为 Cu_6Sn_5 和 Ag_3Sn 金属间化合物。由于对该系焊料的研究者很多，于是出现了许多不同成分组合的配方，其中最受关注的是美国 NEMI 推荐的 Sn—3.9Ag—0.6Cu，欧盟 IDEALS 推荐的 Sn—3.8Ag—0.7Cu，英国 ITRI 推荐的 Sn—（3.4-4.1）Ag—（0.45-0.9）Cu 和日本 JEITA 推荐的 Sn—3.0Ag—0.5Cu，上述几种焊料的性能差异不大，见表 4.5-12。其中 Sn—3.0Ag—0.5Cu 因具有更低的成本而倍受推崇。表 4.5-13 为 Sn—Ag—Cu 系无铅焊料的化学成分和熔点。

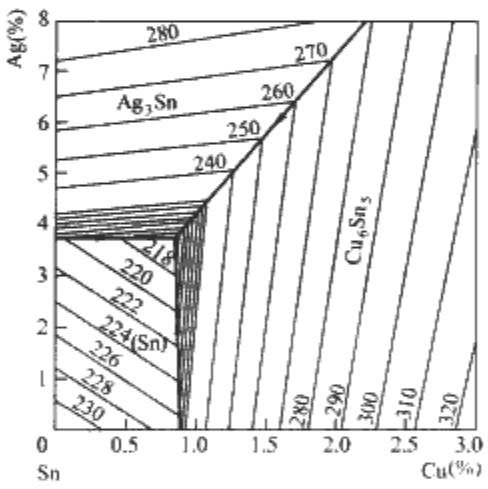


图4.5-10 Sn—Ag—Cu 富 Sn 侧的等温线投影图

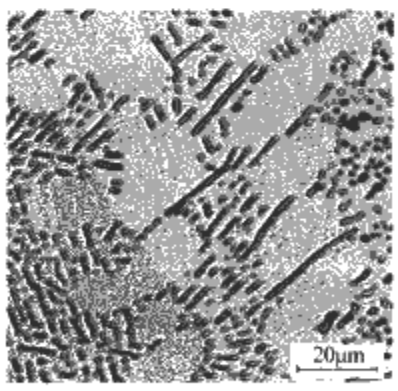


图 4.5-11 Sn—3.8Ag—0.7Cu 焊料微观组织

表 4.5-12 推荐的 Sn-Ag-Cu 焊料性能对比

合 金	拉伸强度（MPa）	伸长率（%）	扩展率（%）	熔化温度（℃）
Sn—3.9Ag—0.6Cu	50.0	24.8	77.3	217～221
Sn—3.8Ag—0.7Cu	48.0	25.3	77.1	217～221
Sn—3.0Ag—0.5Cu	47.5	25.2	77.1	217～221

表 4.5-13 Sn—Ag—Cu 系无铅焊料的化学成分和熔点

化学成分①(%)				熔化温度 (℃)	
Ag	Cu	其他	Sn	固相线	液相线
0.2	2.0	Sb：0.8	余量	219	230
0.3	0.7	—	余量	217	226
0.5	4.0	—	余量	218	226
2.0	0.8	Sb：0.6	余量	210	216
2.0	0.8	Zn：6	余量	217	217
2.5	0.5	Bi：1.0	余量	213	221
2.6	0.8	Sb：0.5	余量	211	226
3.0	0.5	—	余量	217	221
3.5	0.7	RE：0.05	余量	217	219
3.5	0.5	Zn：1	余量	216	217
3.6	1.5	—	余量	217	225
3.8	0.7	—	余量	217	221
3.9	0.6	—	余量	217	221
4.0	0.5	—	余量	217	221
4.1	0.5	In：4.0	余量	205	210
4.7	1.7	—	余量	217	217

① 质量分数。

Sn—Ag—Cu 系焊料的熔点比 Sn—Cu 系和 Sn—Ag 系均低，润湿性好，强度和塑性高，具有优良的耐热疲劳特性，其在 125℃放置的蠕变性能远高于 Sn-Pb 焊料，均衡时间高达 3849h，这与 Cu_6Sn_5 和 Ag_3Sn 金属间化合物均匀分散在母相 Sn 中，且合金组织均匀、致密有关。该系合金由于多方面性能表现较为平衡而被业界所看好，多年来大量的研究数据也大力地推动了它被业界认同和接受。目前应用最多的是 Sn—3.0Ag—0.5Cu 合金，其疲劳寿命高于 Sn—37Pb 近 3 倍。与 Sn—Ag 相比，Sn—Ag—Cu 系焊料对元器件和 PCB 基板上的 Cu 溶蚀程度更小。但在某些方面，Sn—Ag—Cu 焊料的可靠性却比 Sn—37Pb 焊料低，如塑性应变较低，这对于一些大尺寸的蠕变故障等是不利的。Ag、Cu 元素的含量对焊料的润湿性影响不大，图 4.5-12 对不同成分的 Sn—Ag—Cu 焊料在 250℃下的润湿性进行了对比。

向 Sn—Ag—Cu 系焊料内加入微量合金元素，可进一步提高焊料的综合性能。如杭州亚通电子有限公司开发的 Sn—Ag—Cu—Sb—P—RE 系焊料具有良好的润湿性和抗氧化性，北京有色金属研究总院研发的 Sn—Ag—Cu—Cr 系焊料具有高温抗氧化和抗腐蚀性，北京工业大学、大连理工大学开发

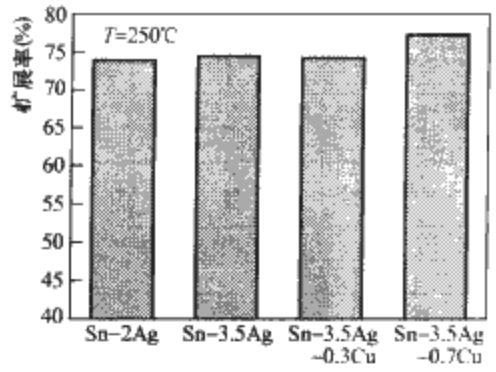


图 4.5-12 Sn—Ag—Cu 系焊料的润湿性

的 Sn—Ag—Cu—RE 焊料以及报道性价比良好的 Sn—Ag—Cu—Sb 等。

添加少量的 Sb，可以细化焊料合金的组织，降低熔点，提高焊料的强度和润湿性。但 Sb 含量不宜过大，否则焊料的脆性增大，影响机械加工性能和焊点的可靠性。

早期的研究人员为了显著降低 Sn—Ag—Cu 系无铅焊料的熔点，向焊料内添加 In、Zn 等降熔点元素，虽然效果比较明显，但 In 是贵金属，且资源有限，而 Zn 的加入会弱化焊料的润湿性和抗氧化性能，正是由于这些缺点的存在，这两种元素目前很少应用在 Sn—Ag—Cu 系焊料上。

添加 Bi 元素，可降低焊料的熔化温度，提高焊料的润湿性和抗蠕变性能，但随着 Bi 添加量的增加，固相线温度会大幅下降，而液相线温度的降幅很小。目前部分元件仍然采用含 Pb 的涂层，使用含 Bi 焊料后，焊点界面附近的组织内易形成 Sn/Pb/Bi 低熔点相（96℃），从而严重地影响焊点的可靠性。

PCB 上 Cu 焊盘的镀层对 Sn—Ag—Cu 焊点界面结构影响很大，图 4.5-13 和图 4.5-14 分别为采用 NiAu 和 HASL 涂层时焊点的界面微观形貌照片。中国科学院上海微系统与信息技术研究所的研究结果表明，使用 NiAu 镀层时，虽然上下界面形成的都是（Cu，Ni）Sn，致使热冲击数增加，（Cu，Ni）Sn 长大，但其整体形貌没有明显变化；使用 HASL 镀层时，界面处的 IMC（金属间化合物）是由 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 组成，热冲击数增加，界面 IMC 表现为明显的两层，两层 IMC 都明显增厚，并在界面处出现 Kirkendall 孔洞。与 HASL 镀层相比，NiAu 镀层 IMC 生长速率较慢，界面无 Kirkendall 孔洞生成，因而具有更高的可靠性。

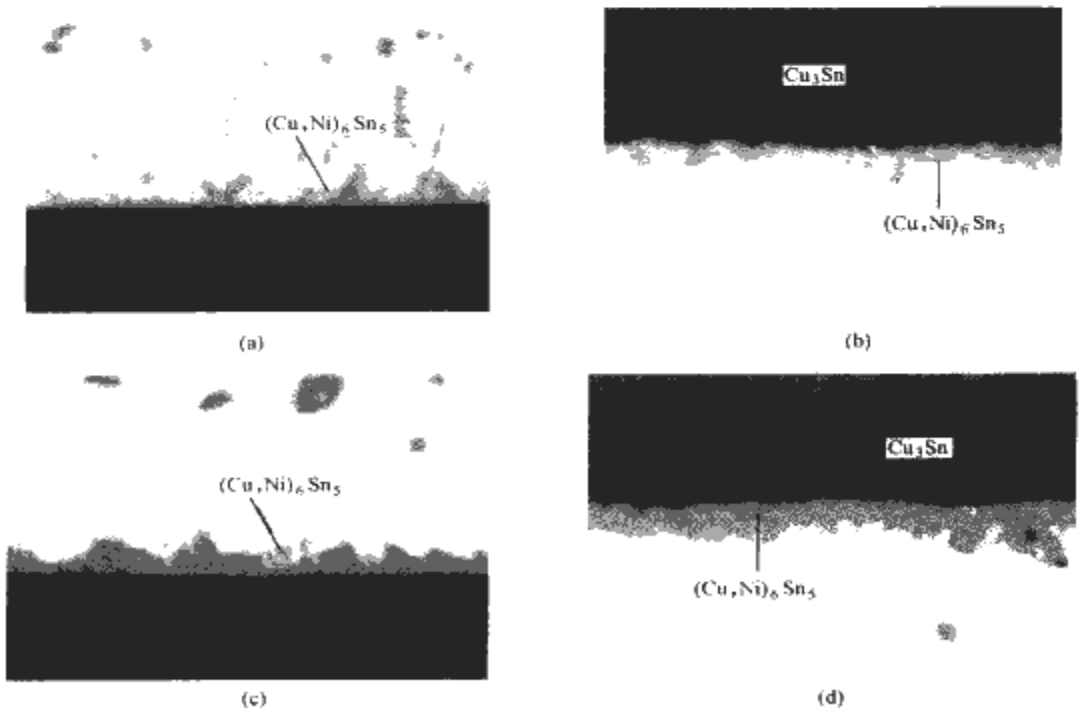


图 4.5-13 焊点界面在不同周期热冲击下的 IMC 形貌演变（镀层为 NiAu）
（a）PCB/Solder 界面（0 次热循环）；（b）Solder/Device 界面（0 次热循环）
（c）PCB/Solder 界面（1500 次热循环）；（d）Solder/Device 界面（1500 次热循环）

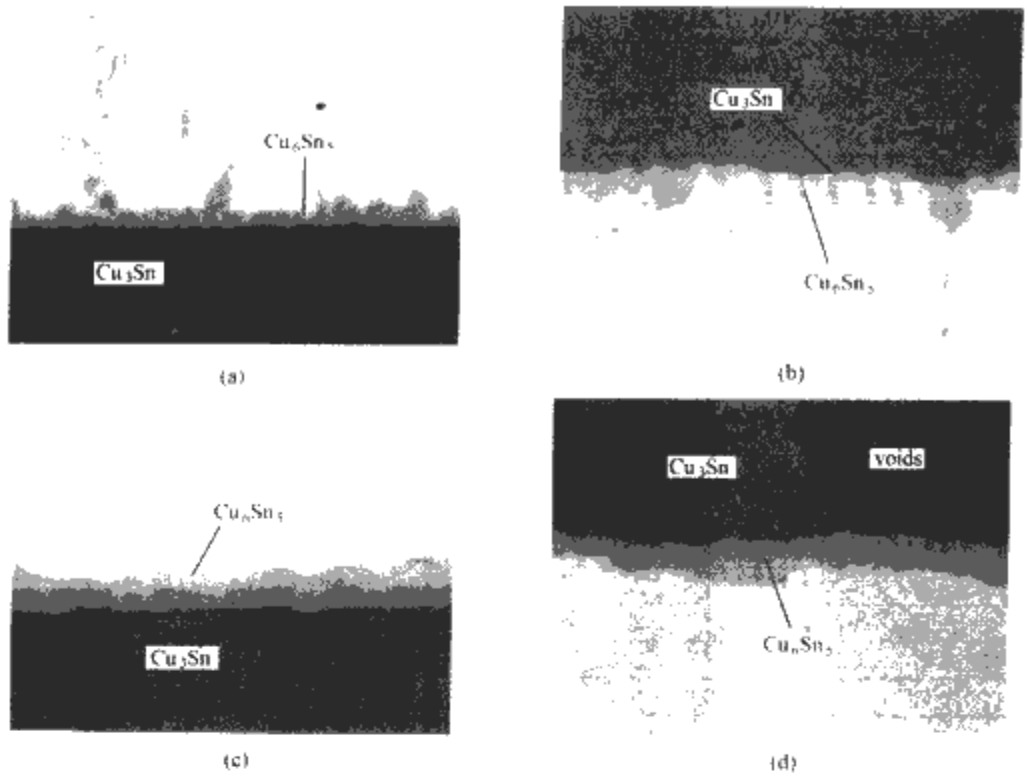


图 4.5-14 焊点界面在不同周期热冲击下的 IMC 形貌演变（镀层为 HASL）
（a）PCB/Solder 界面（0 次热循环）；（b）Solder/Device 界面（0 次热循环）；
（c）PCB/Solder 界面（1500 次热循环）；（d）Solder/Device 界面（1500 次热循环）

Sn—Ag—Cu 系焊料的熔化温度是 217～221℃，必须在达到 240℃时才能完全变为液态，所以焊接温度要达到 245℃左右。Sn—Ag—Cu 焊料的润湿性比 Sn—Pb 焊料差，这是整个无铅焊料都面临的问题。Sn—Ag—Cu 系焊料的机械加工性能较好，可以做成膏状、线状、球状或预制成形等多种形式，已广泛应用于回流焊、波峰焊、手工焊和浸焊等多种焊接工艺。

3.2.4 Sn-Bi 系

Sn—Bi 系焊料具有从 139℃共晶点到 232℃极宽范围内的熔点特性，共晶点 Bi 的质量分数为 57%，可应用于低温钎焊工艺上，图 4.5-15 为 Sn—Bi 二元合金相图。Sn—Bi 二元焊料合金微观组织由（Sn）和（Bi）所构成，其形貌见图 4.5-16，图中的黑色组织是 Sn，白色组织是 Bi，两种组织层状交替，这种组织结构特征导致 Sn—Bi 焊料的强度很高而塑性较差。

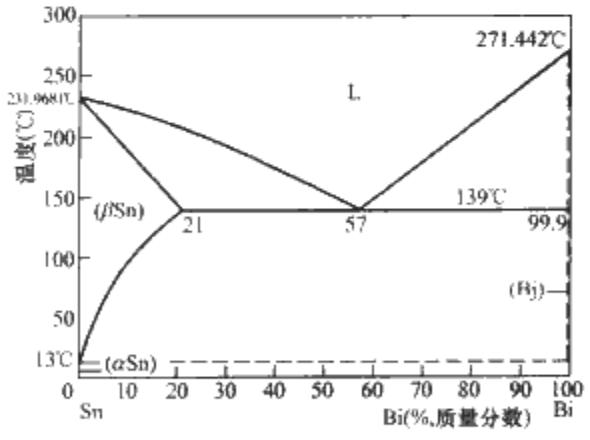


图 4.5-15 Sn—Bi 二元合金相图

Sn—Bi 共晶焊料的优点是热疲劳性能优良，并能够在 170～180℃下进行焊接，对元器件的适应性强。在日本，Sn-57Bi 共晶焊料以低熔点的优势已在主板组装厂进行了量产使用。Bi 含量＜21%时，共晶组织不易出现，但如发生 Bi 的偏析，即使在较低的 Bi 浓度下也易生成共晶组织。表 4.5-14 列出了 Sn -Bi 系无铅焊料的化学成分和熔点。

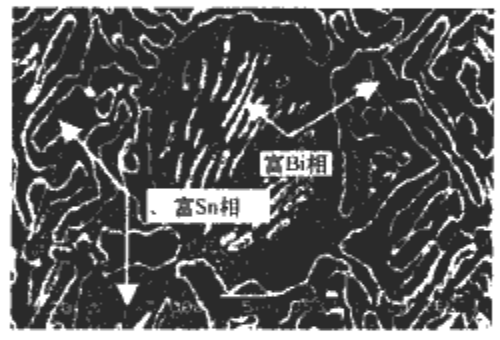


图 4.5-16 Sn—57Bi 焊料微观组织

表 4.5-14 Sn—Bi 系无铅焊料的化学成分和熔点

化学成分①（%）						熔化温度（℃）	
Bi	Ag	Cu	Zn	其他	Sn	固相线	液相线
58	—	—	—	—	余量	139	
4.8	3.4	—	—	—	余量	—	—
7.5	2	0.5	-	·	余量	207	212
10	—	0.8	—	—	余量	185	217
10	—	0.8	1	—	余量	-	—
10	—	—	—	$Sb_{\pm}$ 5	余量	193	232
10	—	—	1	$Sb_{\pm}$ 5	余量	-	—
19.5	2.5	—	—	—	余量	138	196
40	—	—	—	—	余量	139	170
42	—	—	—	—	余量	139	168
56	1	—	—	--	余量	137	
56	—	—	4	--	余量	130	
57	—	—	1.3	—	余量	127	

① 质量分数。

Bi 可显著降低锡合金固相线温度，但对液相线温度作用较小，因此会造成较大的凝固温度范围，易导致焊脚提升，缺陷率增大。Bi 具有非常好的润湿性质和物理性能。一些业界人士认为：Bi 的供货能力可能会因铅产量受到限制而下降，因为 Bi 主要是从铅的副产品中提炼出的，如果

限制使用铅，则铋的产量将会大大减少，尽管能直接开采获取铋，但成本会较高。其实这些担心是不必要的，因为铅主要应用于蓄电池、军工和辐射防护材料等领域，电子产品用铅量占总消耗量的比例还不到 1.5%，见图 4.5-17，因而电子行业限制铅的使用量不会影响铅的总消耗量，也就不会对铋的产量产生过大的冲击。Bi 的主要问题是：Sn-Bi 合金遇到 Pb 以后会形成 Sn—Bi—Pb 低熔点相（熔点只有 96℃），容易导致焊点剥离，会降低焊点的强度和可靠性。由于短期之内电子产品不会立刻全部无铅化，Pb 仍会用在某些元件的端子或印刷电路板焊盘上，如何避免生成低熔点相是生产和使用 Sn—Bi 焊料企业应重点考虑之处。

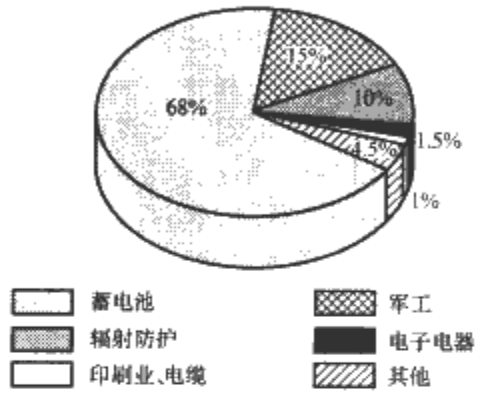


图 4.5-17　铅在各个领域的使用量

Sn—Bi 系焊料的问题是 Bi 易粗化结晶，粗化结晶的性质与金属间化合物相同，在形成粗化结晶的场合其塑性很差，焊点剥离表面呈明显的脆性破坏特征，因此常采用快速冷却和（或）加入第三元组元的方法使 Bi 微细分散，以改善 Bi 原来的脆性，进而改善合金的综合力学性能。目前日本有关厂商在焊料中添加 1%的 Ag 组成共晶，以提高其延伸性，延伸率可达 40%，如图 4.5-18 所示。

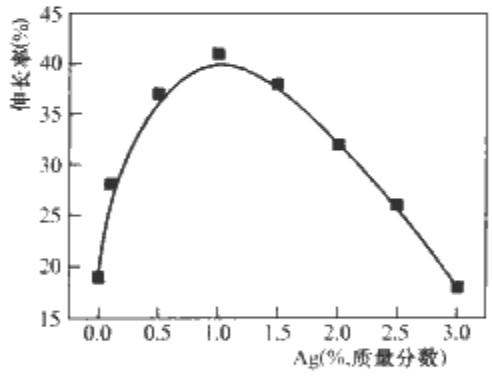


图 4.5-18　Ag 对 Sn—Bi 焊料塑性的影响

3.2.5　Sn-Zn 系

图 4.5-19 为 Sn—Zn 二元合金相图，共晶点成分 Zn 质量分数为 9%，共晶温度为 198℃。该系无铅焊料成本低，熔化温度与锡铅焊料接近，工艺窗口大，从 1999 年起就被 NEC 公司用于 PC 机主基板，已经历了量产化的考验，作为一种适用性材料，在日本已被多家公司采用。表 4.5-15 为几种常用的 Sn—Zn 系无铅焊料的化学成分和熔化温度。

表 4.5-15　Sn—Zn 系无铅焊料的化学成分和熔点

化学成分①（%）					熔化温度（℃）	
Zn	Bi	Al	其他	Sn	固相线	液相线
9	—	—	—	余量	198	
8	3	—	—	余量	186	197
7	—	(30～90) ×10⁻⁶	—	余量	—	-
7	5	—	—	余量	170	190
9	—	—	In：5	余量	188	
9	—	—	In：10	余量	178	

① 质量分数。

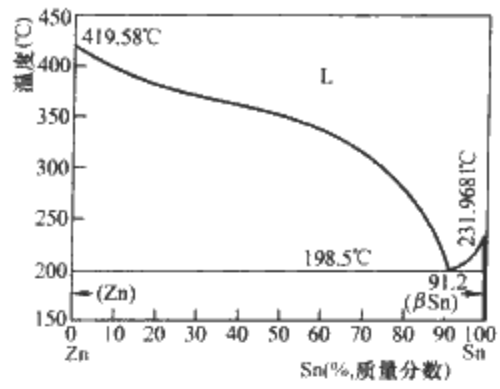


图 4.5-19　Sn—Zn 二元合金相图

Sn—Zn 系焊料在大气中极易氧化，使用传统锡铅焊料用助焊剂时润湿性较差，必须配制针对性的新型焊剂，以解决焊接中的润湿性问题。焊接过程中采用 N_2 等惰性气体进行保护，可降低 Sn—Zn 焊料的氧化程度，提高润湿性和焊接性，但改善程度不大，仅在再流焊中有部分应用。

添加 Bi 可在一定程度上改善 Sn—Zn 合金的易氧化等问题，如 Sn—8.0Zn—3.0Bi，其熔点为 186～197℃，加入 3% 的 Bi 不会显著影响焊料的组织，但可适当改进其润湿性。这种合金曾受到日本一些企业的垂青，但其在工艺性方面仍存在很多困难。目前的电子元件尚没有达到完全无铅化，使用 Sn—8.0Zn—3.0Bi 焊膏在 PCB 的 Cu 镀层上安装 Sn—Pb 合金镀层引线元件时，在接合界面处易形成熔点为 99.5℃ 的 Sn—Pb—Bi 三元共晶相，导致焊料层和界面易发生剥离，产品失效。

Al 的氧化速度比 Zn 快，加入 Sn—Zn 焊料后易偏析于熔融焊料表面，形成致密的氧化膜，可抑制 Zn 的氧化速度和程度。微量的 Al 不影响 Sn—Zn 系焊料的熔点和强度，但能提高焊料的润湿性，见图 4.5-20，并可分散 Zn 结晶形成的柱状偏析，使组织致密，从而提高焊料的塑性。然而 Al 添加量过大，将导致熔融焊料表面的 Al 氧化膜厚度增加，会降低焊料的铺展和润湿性，同时会促进由 Al—Zn 形成的特异蝶形结晶的巨大变化，弱化焊料的机械性能。研究结果表明，Al 的最佳添加量为(30～90)×10⁻⁶。富士通从 2002 年起就已将 Sn—Zn—Al 焊料应用于 LCD 显示装置、连续并联卡、通信机器、外存储装置、个人电脑主板等的组装和封装。

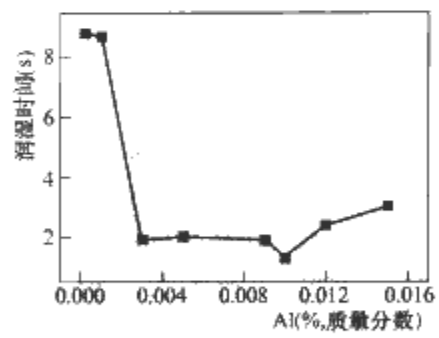


图 4.5-20　Sn—Zn 焊料内 Al 含量对润湿性的影响

添加微量稀土，可细化 Sn-Zn 焊料的组织，改善力学性能，提高润湿性，但改善程度较小。

Sn—Zn 焊料的塑性非常差，难以制成细线径的焊丝，通过添加适量的 Al 可提高其延展性，制造外径 ϕ0.33mm，树脂径 ϕ0.14mm 的线焊料。

南昌大学研究了 Sn—9Zn/Cu 焊点的抗蠕变性能，并采用 $SnCl_2$ 作为活性剂，分析了不同松香含量助焊剂对焊点剪切蠕变的影响，如图 4.5-21 和图 4.5-22 所示。研究结果表明：最佳的 $SnCl_2$ 质量分数为 5%，较高的松香浓度有利于提高焊点的抗剪切蠕变强度，而对瞬时剪切强度影响不大。

由于含有活泼元素 Zn，Sn—Zn 系焊料的耐蚀性和抗氧化性较差，流动性不好，焊接过程中需要活性较强的焊剂和惰性气体保护，焊点可靠性差，极易形成翘起、润湿不良、短路和焊料不足等缺陷。目前，Sn—Zn 系焊料主要做成焊膏，应用于再流焊工艺，在波峰焊、浸焊和手工烙铁焊上还无法达到量产化，该方面的研究正在进行中。开发出相匹配的助焊剂是 Sn—Zn 系焊料面临的难题和实现实用化的关键技术。

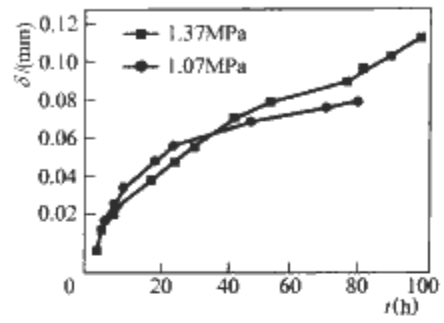


图 4.5-21 焊点剪切蠕变实验中的中心位移曲线

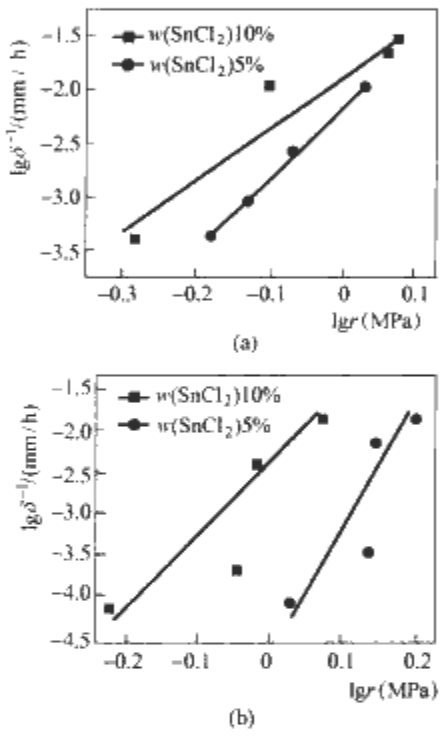


图 4.5-22 不同助焊剂对 Sn—9Zn/Cu 焊点的剪切蠕变中心位移速率的影响

(a)(松香)30%—w($SnCl_2$)(5%～10%)—(缓蚀剂)10%；

(b)(松香)50%—w($SnCl_2$)(5%～10%)—W(缓蚀剂)10%

3.2.6 Sn—In 系

Sn—In 系焊料属于低熔点软焊料，共晶点处 In 的质量分数为 51%，共晶温度为 120℃，图 4.5-23 为 Sn—In 二元合金相图，该系无铅焊料的化学成分和熔点见表 4.5-16。由于熔点低，Sn—In 系只能用于低温焊接工艺，应用范围较小，同时焊料内的贵金属 In 含量较大，焊料的成本非常高，价格很贵，加上 In 的资源有限，极大地限制了这类焊料的广泛应用。

表 4.5-16 Sn—In 系无铅焊料的化学成分和熔点

化学成分①（%）				熔化温度（℃）	
In	Ag	其他	Sn	固相线	液相线
51	—	—	余量	120	
5	—	—	余量	—	—
8.8	—	Zn：7.6	余量	181	187
10	1	Sb：0.5	余量	196	206
20	2.8	—	余量	178	189
20	3	RE：0.01—0.1	余量	178	189
52	—	—	余量	117	154

① 质量分数。

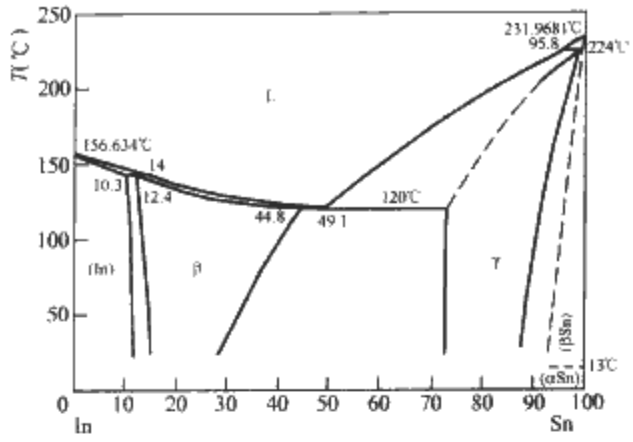


图 4.5-23 Sn—In 二元合金相图

Sn—Ag/Cu、Sn—Cu/Cu 和 Sn—Ag—Cu/Cu 的界面主要是通过焊料内的 Sn 元素和母材 Cu 在界面发生冶金反应，形成锡铜金属间化合物层。与上述几种焊料相比，Sn—In/Cu 的界面组织比较特殊，Sn-In 焊料内的 In 元素也参与了化合物的形成，从而在界面处形成 Cu_3（In，Sn）和 Cu_6（In，Sn）$_5$ 金属间化合物。

3.2.7 Sn—Sb 系

Sn—Sb 系无铅焊料属于高温软焊料，和 Sn—Ag 焊料一样也有相当久的实际使用经验，图 4.5-24 为 Sn—Sb 二元合金相图。目前该系焊料的配方种类不多，其化学成分和熔点见表 4.5-17。Sn—5Sb 焊料是该系应用最广泛的无铅焊料，虽然它的强度比 Sn—37Pb 低，但其塑性应变很好，疲劳寿命也优于 Sn—37Pb，约为后者的 1.4 倍，具有良好的耐冲击性能。

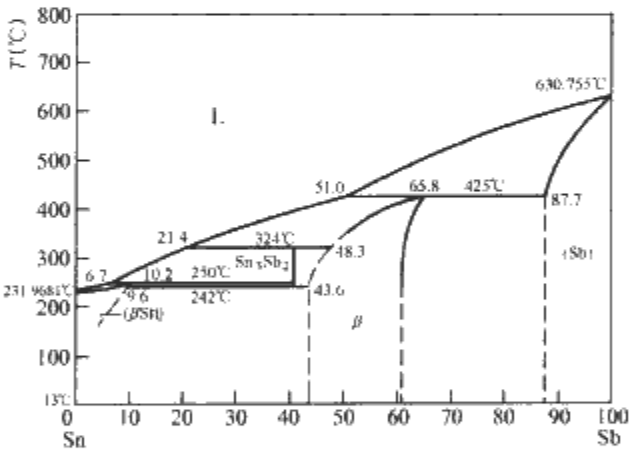


图 4.5-24 Sn—Sb 二元合金相图

Sn—Sb 焊料的熔点比传统 Sn—Pb 焊料高许多，这意味着焊接过程中需要更高的焊接温度，因而焊接设备和元器件要具有优异的耐热性能。

表 4.5-17 Sn—Sb 系无铅焊料的化学成分和熔点

化学成分①（%）						熔化温度（℃）	
Ag	Sb	Bi	In	其他	Sn	固相线	液相线
0.5	3	1.5	—	—	余量	—	—
0.1	3.9	1	—	—	余量	—	—
—	4	—	—	Zn：8	余量	198	204
—	5	—	—	—	余量	232	240
2	7.5	0.5	—	—	余量	229	238

① 质量分数。

3.2.8 无铅焊料的应用

根据世界主要电子产品制造商的问卷调查结果，图 4.5-25 分别示出了目前不同系列无铅焊料在回流焊、波峰焊和

手工烙铁焊中所占的比例。由该图可见：再流焊工艺主要使用 Sn—Ag—Cu 系和 Sn—Ag 系无铅焊料；手工烙铁焊主要用 Sn—Ag—Cu 系、Sn—Ag 系和 Sn—Cu 系无铅焊料；波峰焊中主要用 Sn—Cu 系和 Sn—Ag—Cu 系无铅焊料。其中 Sn—Ag—Cu 系焊料是再流焊和手工烙铁焊的主流用品，而 Sn—Cu 焊料则是波峰焊的主流用品。

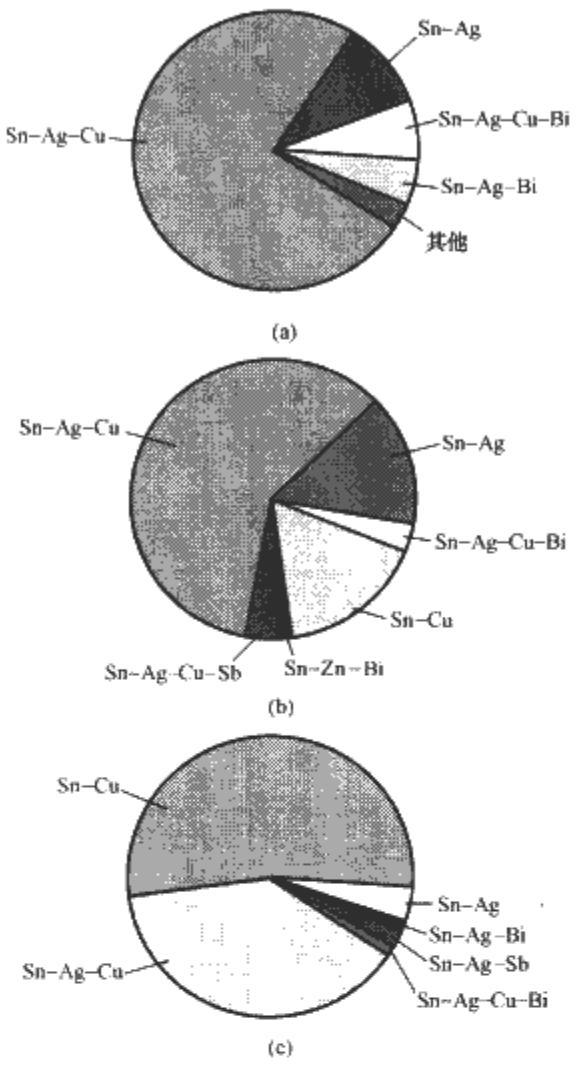


图 4.5-25 不同系列无铅焊料的使用比例
（a）再流焊用无铅焊料；（b）手工烙铁焊用无铅焊料；
（c）波峰焊用无铅焊料

无铅焊料的种类很多，世界电子行业和诸多厂商对多种无铅焊料及焊点的可靠性进行了多方面的认证和实验。根据焊料的焊接性、物理和力学性能、封装工艺以及成本等特点，Sn—Cu 系和 Sn—Ag—Cu 系是目前电子行业使用最多的两类无铅焊料。Sn—Cu 焊料的显著优点是成本较低，价格低廉，但其润湿性较差；Sn—Ag—Cu 焊料是目前公认的性能最佳的无铅焊料，但其缺点是焊料内的贵金属 Ag 含量大，价格太贵。

目前应用的无铅焊料或是熔点太高，或是润湿性较差，或是成本太高，尚需进一步的深入研究，开发出低成本、低熔点，综合性能优异的无铅焊料，以满足电子行业飞速发展的需求。

3.3 金基软焊料

金基焊料主要用于半导体器件的组装，已有悠久的使用历史，如绝缘基片与硅芯片、硅芯片与引线的钎焊及外壳封装等。为了提高焊点的机械和电连接的可靠性，硅片表面通常镀金或渗金，而使用金基软焊料可以大大减少镀金层向焊料中的溶解。金基焊料的优点是蒸汽压低，耐腐蚀性好，流动性和润湿性优异，但其缺点是价格非常昂贵，所以仅应用于特殊用途。半导体器件常用金基软焊料的成分和性能如表 4.5-18 所示。

表 4.5-18 半导体器件用金基软焊料

化学成分①（%）				熔化温度（℃）
Au	Sn	Ge	其他	
余量	40	—	Ag：30	411
余量	—	—	Si：2	370
余量	—	—	Si：3	363
余量	—	—	Sb：0.5	360
余量	—	12	Ag：2	358
余量	—	12	—	356
余量	—	12	Ni：0.5	356
余量	20	—	—	280
余量	90	—	—	217

① 质量分数。

向金基焊料中加入 Sn 元素，可显著降低焊料的熔点，提高润湿性、力学性能和化学稳定性。加入少量 Si 和 Ge 等元素，可提高金基焊料的导电性。但 Si 和 Ge 元素易氧化，含有这两种元素的焊料通常需要在氮气等惰性气体保护条件下进行钎焊。由于金基焊料硬而脆，通常仅用于小尺寸芯片的钎焊。

3.4 铟基焊料

铟熔点较低（为 156℃），可与 Sn、Zn、Ag 等元素形成一系列低熔点共晶焊料。铟基焊料对碱性介质有较高的抗腐蚀性，对金属和非金属都具有良好的润湿能力，形成的焊点具有电阻低、塑性高等优点，可用于不同热膨胀系数材料的匹配封装，因而铟基焊料主要应用于电真空器件、玻璃、陶瓷和低温超导器件的封装上。然而，铟的资源有限，其价格也日益昂贵，从而严重限制了铟基焊料的广泛应用，目前该类焊料仅使用于一些特殊用途。常用铟基焊料的化学成分和性能见表 4.5-19 所示。

表 4.5-19 铟基焊料的化学成分和性能

化学成分②（%）				熔点（℃）		力学性能		电导率（%）（IACS①）
In	Sn	Zn	Ag	固相线	液相线	拉伸强度（MPa）	伸长率（%）	
100	—	—	—	157	157	0.4	41	24.0
余量	—	2	—	143	143	—	—	—
余量	48	—	—	117	117	1.2	83	11.7
余量	46	2	—	108	—	—	—	—
余量	—	—	10	204	230	1.1	61	22.1

① 相对标准退火铜线电导率的百分比。
② 质量分数。

3.5 铋基焊料

铋基焊料属于低熔点软焊料，主要通过添加 Pb、Sn、Cd 等元素而形成系列熔点低于 150℃ 的焊料，并通过添加微量 Ag、In、Sb、Zn 等元素而制备出性能不同的低熔点焊料，表 4.5-20 为常用铋基软焊料的化学成分和性能。Pb 是传统铋基焊料中的主要添加元素，在产品无 Pb、无 Cd 化的今天，这类焊料显然已不符合时代的发展，属于被淘汰之列。由于 Bi 性脆，导致铋基焊料也性脆、光泽性非常差。

表 4.5-20 铋基软焊料

化学成分①（%）						熔化温度（℃）	
Bi	Pb	Sn	Cd	In	其他	固相线	液相线
42.91	21.7	7.97	5.09	18.33	Ag：4.0	38.0	43.0
44.7	22.6	11.3	5.3	16.1	—	44.7	52.2
44.7	22.6	8.3	5.3	19.1	—	47.5	47.5
47.5	25.4	12.6	9.5	5	—	56.7	65.0
49	18	15	—	18	—	57.8	68.9
49	18	12	—	21	—	58	58
53.5	17.0	19	—	—	Ag：10.0	60	60
50	25	12.5	12.5	—	—	60.5	60.5
50.1	26.6	13.3	10.0	—	—	68	68
50	26.7	13.3	10	—	—	70	70
50.5	27.8	12.4	9.3	—	—	70	73
50	25	12.5	12.5	—	—	70	74
50	34.5	9.3	6.2	—	—	70	79
42.5	37.7	11.3	8.5	—	—	70	90
50.7	30.91	14.97	3.4	—	—	70	84
35.1	36.4	19.06	9.44	—	—	70	101
57	17	—	—	26	—	78.9	78.9
51.6	40.2	—	8.2	—	—	91.5	91.5
50	30	20	—	—	—	92	92
50	25	25	—	—	—	93	93
52.5	32.0	15.5	—	—	—	95	95
50	31.25	18.75	—	—	—	95	95
56	22	22	—	—	—	95	104.5
67	16	17	—	—	—	95	149
50	28	22	—	—	—	95.5	109.5
50	28	22	—	—	—	100	100
33.33	33.34	33.33	—	—	—	101	143
54.0	—	26.0	20	—	—	103	103
48.0	28.5	14.5	—	—	Sb：9.0	103	127
40	40	20	—	—	—	113	113
55.5	44.5	—	—	—	—	124	124
56.0	—	40.0	—	—	Zn：4.0	130	130
58.0	—	42.0	—	—	—	138.5	138.5
40	—	60	—	—	—	138.5	170
60	—	—	40	—	—	144	144

① 质量分数。

3.6 铝用锌基焊料

锌基焊料主要用于铝及铝合金的钎焊。通常加入 Sn 来降低锌基焊料的熔点，加入银、铜、铝等来提高焊料的抗腐蚀性能。锌基焊料的主要成分、性能和用途见表 4.5-21。

表 4.5-21 锌基焊料的主要成分及用途

化学成分①（%）					熔化温度（℃）	用 途
Zn	Al	Sn	Cu	其他		
95	5	—	—	—	382	用于钎焊铝和铝合金以及铝铜接头
89	7	—	4	—	377	
86	6.7	2	3.8	Bi1.5	304～350	主要用于钎焊铜和铜合金
72.5	27.5	—	—	—	430～500	用于钎焊固相线温度低的铝合金，接头抗腐蚀性是锌基焊料中最好的
58	—	40	2	—	200～350	用于铝的刮擦钎焊，钎焊接头具有中等抗腐蚀性

① 质量分数。

3.7 其他软焊料

热压钎焊在微电子的自动化组装上应用很普遍，表 4.5-22为适合热压钎焊封装的主要软焊料。

表 4.5-22 热压钎焊用软焊料

化学成分①（%）						熔化温度（℃）	主要用途
Au	Si	Ge	Ag	Sn	Pb		
98	2	—	—	—	—	370	片状有源元件的倒装
88	—	12	—	—	—	356	片状有源元件的倒装
—	—	—	—	—	100	327	LID、梁式引线、倒装片、无源元件装配
—	—	—	1.5	1	97.5	309	LID、梁式引线、倒装片、无源元件装配
80	—	—	—	20	—	280	片状有源元件的倒装、壳体密封
—	—	—	3.5	96.5	—	221	LID、梁式引线、倒装片、无源元件装配
—	—	—	2	62	36	181	LID、梁式引线、倒装片、无源元件引线焊接
—	—	—	—	63	37	183	LID、梁式引线、倒装片、无源元件壳体封装

① 质量分数。

锡铅焊料在有源和无源元件的钎焊上应用较多，其优点是可以消除热应变和易于更换元件，但其缺点是容易溶蚀金和银。通过向焊料内加入少量的 Ag，能防止焊料溶蚀引线等的镀银层，并改善润湿性和热疲劳性能。由于 In 对 Au、Ag、Pd 的溶蚀作用较小，因此大量应用于厚膜电路。厚膜电路用软焊料见表 4.5-23，微组装用软焊料见表 4.5-24。

表 4.5-23 厚膜电路用软焊料

化学成分①（%）				熔点（℃）
Ag	Sn	Pb	In	
5	—	95	—	360
—	5	95	—	315
—	—	95	5	314
5	—	90	5	310
2.5	—	97.5	—	304
—	10	90	—	360
2.5	—	92.5	5	285
—	—	75	25	260
—	—	50	50	209
—	—	—	100	157
5	—	15	80	149

① 质量分数。

表 4.5-24 微组装用软焊料及其特性

化学成分①(%)					熔化温度(℃)		拉伸强度(MPa)	延伸率(%)	电导率(%)(IACS)
Ag	Pb	Sn	Sb	In	固相线	液相线			
—	—	48	—	52	117	117	1.2	83	11.7
—	—	—	—	100	157	157	0.4	41	24.0
5	15	—	—	80	149	149	1.8	58	13.0
3.5	96.5	—	—	—	221	221	2.0	73	14.0
10	—	—	—	90	204	230	1.1	61	22.1
—	—	100	—	—	232	232	2.8	55	13.1
—	—	95	5	—	232	240	4.1	38	—
5	—	95	—	—	221	250	5.6	30	12.6
—	90	10	—	—	224	302	4.1	45	8.5
2.5	97.5	—	—	—	303	303	3.1	42	8.8
1.5	97.5	1	—	—	309	309	3.1	23	—
5	90	—	—	5	290	310	4.0	23	5.6
—	95	—	—	5	315	315	3.0	52	5.1

① 质量分数。

3.8 铜基焊料

Cu 的熔点是 1083℃，可以直接用作焊料在还原性气氛和真空条件下钎焊低碳钢、低合金钢、钨、钼、可伐合金和镍合金等，钎焊温度为 1100～1150℃。但纯铜作为焊料的缺点是熔点高、耐腐蚀及抗氧化性能差，容易使一些被焊金属或合金的晶粒过分长大，导致力学性能恶化。通过向 Cu 中加入 P、Zn、Ge、Sn、Ni、Mn、Ag、Co 等元素，可以克服纯 Cu 作为焊料的一些缺点，提高 Cu 焊料的物理、力学性能和焊接性。表 4.5-25 列出了性能不同的系列铜基焊料。

3.9 银基焊料

银基焊料熔点低，焊接性好，其力学性能、导电性、耐腐蚀性和工艺性能优异，可用来钎焊除铝、镁及其他低熔点金属外的几乎所有黑色金属和有色金属，应用非常广泛。表 4.5-26 列出了不同系列 Ag 基焊料的化学成分和性能。银基焊料的缺点是，成本太高，价格昂贵，并且焊后接头的工作温度不能超过 300℃，否则会严重弱化接头强度，但含 Ni 的银基焊料可在 400℃左右工作。

为了降低焊料的熔点和 Ag 含量，进一步提高焊料的耐腐蚀性、抗氧化性、润湿性和力学性能，通常向银基焊料内加入 Zn、Ni、Pd、Al、Mn、P、Sn 等合金元素，从而形成性能不同的系列产品。如：加入 Ni 可提高银基焊料的耐热性、耐腐蚀性和润湿性；加入 Zn 可降低焊料的熔点，为保证焊料的力学性能，Zn 的加入量不宜超过 35%；加入 Mn 能提高焊料的强度，并改善焊料对钢的润湿性；加入 Cd 元素可以降低 Ag 焊料的熔点，提高其润湿性，但 Cd 属于有毒元素，为欧盟 ROHS 指令和我国指令严格限用的有害元素之一，含 Cd 的银基焊料必将逐步退出市场，因而本书未将该类焊料列入表内。

表 4.5-25 铜基焊料的成分及性能

型 号	化学成分① (%)									熔化温度(℃)	钎焊温度(℃)	抗拉强度(MPa)	特点及用途
	Cu	P	Zn	Ag	Sn	Ge	Ni	Mn	其他				
Cu	99.95	—	—	—	—	—	—	—	—	1083	1100～1150	—	对钢的润湿性和填缝能力好，可直接在还原性气氛或真空下钎焊钨、钼、铁、镍及其合金
Cu94P	93.7	6.3	—	—	—	—	—	—	—	720～800	810～900	441	属于空气自钎剂料，应用广泛。P 能降低 Cu 焊料的熔点。进一步加入 Ag 可改善焊料的塑性和机械加工性，提高强度和导电性，同时降低焊料熔点和提高润湿性，适合于各种碳钢的钎焊
Cu93P	92.9	7.1	—	—	—	—	—	—	—	710～800	810～900	470	
Cu91PAg	91	7	—	2	—	—	—	—	—	645～790	750～810	—	
Cu89PAg	89	6	—	5	—	—	—	—	—	645～815	820～860	519	
Cu80PAg	80	5	—	15	—	—	—	—	—	630～780	810～850	503	
Cu70PAg	70	5	—	25	—	—	—	—	—	650～710	730～790	—	
Cu28PAg	28	1	—	71	—	—	—	—	—	750～795	810～870	—	
Cu86PSn	86	5.5	—	—	7.5	—	—	—	—	620～670	700～780	—	
Cu92PSn	92	5.5	—	—	2.5	—	—	—	—	640～680	710～800	560	
Cu82Pd	82	—	—	—	—	—	—	—	Pd:18	1080～1090	1100～1200	—	高温性能优良，对钢和镍合金焊接性好；钯的蒸汽压低，不易挥发，适用于气体保护钎焊和真空钎焊。但 Pd 为贵金属，仅限用于特殊用途
Cu55PdNiMn	55	—	—	—	—	—	15	10	Pd:20	1070～1105	1100～1200	—	
Cu35PdNiMn	35	—	—	—	—	—	20	15	Pd:30	1050～1090	1100～1200	—	
Cu89PSn	89	6.5	—	—	5.5	—	—	—	—	650～800	810～890	—	用 Sn、Sb、Ni 等元素取代贵金属 Ag，来降低 Cu-P 焊料的熔点，但易导致焊料强度的降低
Cu83PNi	83	8	—	—	—	—	9	—	—	648～685	710～790	—	
Cu92PSb	92	6	—	—	—	—	—	—	Sb:2	690～800	820～880	305	
Cu81PSnNi	81	3～10	—	—	3～10	—	2～10	—	—	620～660	680～800	—	
Cu77PSnNi	77	7	—	—	10	—	6	—	—	585～647	680～800	—	
Cu86PSnNi	86	5	—	—	8	—	1	—	—	620～650	700～800	—	

① 质量分数。

续表

型 号	化学成分①(%)									熔化温度(℃)	钎焊温度(℃)	抗拉强度(MPa)	特点及用途
	Cu	P	Zn	Ag	Sn	Ge	Ni	Mn	其他				
Cu80PSnAg	80	5	—	5	10	—	—	—	—	560～670	680～800	250	用 Sn、Sb、Ni 等元素取代贵金属 Ag，来降低 Cu—P 焊料的熔点，但易导致焊料强度的降低
Cu81PAgNi	81	7	—	2	—	—	2	—	—	631～680	700～800	—	
Cu58ZnMn	58	—	38	—	—	—	—	4	—	880～909	930～1020	—	添加 Mn 可以提高焊料的强度、塑性和润湿性能，适合于钎焊硬质合金刀具
Cu57ZnMnCo	57	—	39	—	—	—	—	2	Co:2	890～930	950～1050	—	
Cu48ZnNi	48	—	42	—	—	—	10	—	—	921～935	960～1050	—	
Cu62ZnSiSnNi	62	—	37	—	0.4	—	0.4	—	Si:0.5	858～875	900～990	390	
Cu36Zn	36	—	62～66	—	—	—	—	—	—	800～823	850～950	29	主要用于以气体火焰、感应，盐浴浸渍钎焊等方法来钎焊铜及铜合金、镍、钢、硬质合金等，当 Zn 含量小于 40%时，合金强度和塑性均表现优良。黄铜中加入少量的 Si 可抑制 Zn 的挥发，但 Si 能显著降低 Zn 在 Cu 中的溶解度，加入量一般小于 0.5%； Cu 中加入少量的 Sn 和 Ni 可以提高焊料的润湿性，但 Sn 会降低 Zn 在 Cu 中的溶解度，加入量一般小于 1%
Cu48Zn	48	—	50～54	—	—	—	—	—	—	860～870	890～990	206	
Cu54Zn	54	—	44～48	—	—	—	—	—	—	885～888	910～1000	255	
Cu62Zn	62	—	37～39	—	—	—	—	—	—	890～905	930～1020	314	
Cu62ZnSi	62	—	37.5	—	—	—	—	—	Si0.5	905	930～1020	333	
Cu60ZnSn	60	—	35	—	5	—	—	—	—	800～808	820～920	—	
Cu60ZnSn—R	60	—	39	—	1	—	—	—	Si0.2	890～905	930～1020	343	
Cu58ZnSnFe—R	58	—	40	—	0.8	—	—	—	Fe1 Si0.1	865～890	930～1020	392	
Cu62ZnMn	62	—	35	—	—	—	—	3	—	890～905	930～1020	343	
Cu96Si	96	—	—	—	—	—	—	—	Si:4	910～1000	1010～1170	—	对 Cu、Ni、Fe 及其合金焊接性好，适用于真空器件的钎焊
Cu88Si	—	—	—	—	—	—	—	—	Si:12	810～990	900～1150	—	
Cu92Ge	92	—	—	—	—	8	—	—	—	945～960	960～1016	—	加入 Ge 可明显降低焊料的熔点，Cu—Ge 焊料的蒸汽压很低，主要用于钎焊电真空器件。加入少量 Ni 可以使焊料良好润湿 Mo、W、Ni、Fe 及其合金，增加流动性和塑性，可用于陶瓷—金属的封接；加入 Ag 能提高润湿性和流动性，适宜钎焊可伐、W、Ni 及陶瓷—金属封接；加入 Si 可降低熔点；加入 Ti 可改善焊料塑性，提高钎缝强度和降低表面粗糙度，并获得细晶粒的组织
Cu90Ge	90	—	—	—	—	10	—	—	—	880～910	920～1000	—	
Cu88Ge	88	—	—	—	—	12	0.2～5	—	—	850～880	880～960	—	
Cu94GeNi	94	—	—	—	—	4	2	—	—	1041～1069	1100～1200	—	
Cu93GeSi	93	—	—	—	—	4.5	—	—	Si:2.5	912～1006	1030～1120	—	
Cu88GeTi	88	—	—	—	—	12	—	—	Ti:0.2	—	—	—	
Cu88GeAg	88	—	—	2	—	10	—	—	—	950～1000	1130～1200	—	
Cu70Au	70	—	—	—	—	—	—	—	Au:30	1015～1035	1050～1150	—	具有良好的润湿性，熔点较高，可钎焊 Cu、可伐合金、Mo、W、Ni 和钢等，可用作电真空器件的第一级焊料
Cu65Au	65	—	—	—	—	—	—	—	Au:35	975～1030	1030～1090	—	
Cu62Au	62	—	—	—	—	—	—	—	Au:38	980～1000	1010～1100	—	
Cu62AuNi	62	—	—	—	—	—	3	—	Au:35	974～1028	1040～1150	—	

续表

型 号	化学成分①(%)									熔化温度(℃)	钎焊温度(℃)	抗拉强度(MPa)	特点及用途
	Cu	P	Zn	Ag	Sn	Ge	Ni	Mn	其他				
Cu98Ni	98	—	—	—	—		2	—	—	1085～1100	1090～1200	—	加入Ni可以提高焊料的高温强度，但熔点升高；进一步加入适量的Si和少量的B可降低焊料熔点，提高润湿性
Cu90Ni	90	—	—	—	—		10	—	—	1130～1145	1150～1230	—	
Cu75Ni	75	—	—	—	—		25	—	—	1170～1225	1240～1300	—	
Cu97NiB	97	—	—	—	—	—	3	—	B：0.04	980～1045	1100～1150	—	
Cu93NiSi	93	—	—	—	—	—	5	—	Si：1	995～1110	1120～1200	—	
Cu71NiSi	71	—	—	—	—	—	25	—	Si：4	1030～1140	1160～1250	—	
Cu67NiCr	67	—	—	—	—	—	17	—	—	1010～1180	1185～1250	—	
Cu50NiMn	50	—	—	—	—	—	30	20	—	1050～1100	1150～1250	—	
Cu77NiCrCo	77	—	—	—	—	—	10	—	Cr：8 Co：5	1065～1180	1180～1250	—	
Cu67NiSiBFe	67	—	—	—	—	—	29	—	B：0.2 Fe：1.5 Si：2	1080～1120	1150～1250	—	
Cu98Mn	98	—	—	—	—	—	—	2	—	970～1060	1080～1150	—	Cu—Mn二元焊料并不多见，通常在Cu—Mn合金中加入Ni或Co，以提高焊料的强度，并广泛用于钎焊钢、高温合金、硬质合金等； Cu—Ni—Co焊料的性能优于Cu—Mn—Ni焊料，是铜基焊料中熔化温度较低而强度最高的焊料，并对钎焊间隙没有镍基焊料敏感，主要用于取代金基焊料来钎焊航空发电机的重要部件； Cu52MnAuNi焊料具有良好的润湿性，可用于制造金刚石聚晶工具。其熔化温度对金刚石物化性能影响很小
Cu87MnCo	87	—	—	—	—	—	—	10	Co：3	960～1030	1050～1100	—	
Cu74MnCoSn	74	—	—	—	—	—	—	14	Co：6	960～1030	1050～1100	—	
Cu67MnCo	67	—	—	—	—	—	—	24	Co：9	870～940	950～1050	—	
Cu58MnCo	58	—	—	—	—	—	—	32	Co：10	883～943	970～1050	—	
Cu64MnNi	64	—	—	—	—	—	10	30	—	860～900	900～1080	—	
Cu52MnNi	52	—	—	—	—	—	10	38	—	880～925	950～1070	—	
Cu50MnNi	50	—	—	—	—	—	10	40	—	880～925	950～1030	—	
Cu76MnNiSnIn	76	—	—	—	2	—	5	15	In：2	890～950	980～1050	—	
Cu52MnAuNi	52	—	—	—	—	—	4	29	Au：15	880～910	940～1100	—	

① 质量分数。

表 4.5-26 Ag基焊料的化学成分、性能和用途

型 号	化学成分①（%）							熔化温度（℃）	抗拉强度（MPa）	钎焊温度（℃）	特点及用途
	Ag	Cu	Zn	Pd	Mn	Ni	其他				
Ag72Cu	余量	28	—	—	—	—	—	779	343	780～900	熔点低，没有凝固温度区间，工艺性能好，是电真空器件上应用最广泛的共晶型焊料；在铜、铜合金和镍上具有极佳的润湿和铺展能力，导电性高。但是该焊料的脆性大，强度低，对不锈钢、合金钢、高温合金等润湿性较差，钎焊时需预先在金属表面上镀镍或铜，以改善润湿性

① 质量分数。

续表

型 号	化学成分[①]（%）							熔化温度（℃）	抗拉强度（MPa）	钎焊温度（℃）	特点及用途
	Ag	Cu	Zn	Pd	Mn	Ni	其他				
Ag50 Cu	余量	50	—	—	—	—	—	779～850	—	850～950	性能与 Ag72Cu 接近，且银含量低，塑性得到改善；但熔化温度区间增大，适宜于钎焊宽间隙接头，可用于多级钎焊时的前级钎焊
Ag92 Cu	余量	8	—	—	—	—	—	830～890	343	900～980	流动性好，强度和耐腐蚀性能比 Ag72Cu、Ag50Cu 有所提高，多用于钎焊钛合金和不锈钢，由于熔点较高，可用于分级钎焊的第一级
Ag95 Al	余量	—	—	—	—	—	Al5	840～870	—	870～960	加入 Al 后，焊料的熔点降低，是银基焊料中强度高、抗腐蚀性能及耐热性能均相当优异的焊料；主要用于钎焊 400℃以下使用的受力构件
Ag87 Al	余量	—	—	—	—	—	Al3	735～750	—	750～820	熔点比 Ag95Al 低，性能也与之接近，主要用于钎焊钛合金
Ag94 AlMn	余量	—	—	—	1	—	Al5	780～825	—	825～925	在 Ag95Al 的基础上加入 1%的锰，可显著提高钛合金钎焊接头的抗腐蚀性能
Ag85 Mn	85	—	—	—	15	—	—	960～970	—	970～1050	熔点高，高温强度好，可用于钎焊 400℃以下工作的不锈钢和钛合金
Ag80 Au	80	—	—	—	—	—	Au20	970～985	—	985～1065	性能优异的耐热焊料，但成本太高，很少使用
Ag90 Pd	90	—	—	10	—	—	—	1002～1065	—	1070～1150	中温强度高，耐腐蚀、抗氧化性和润湿性优异，接头塑性好
Ag80 Pd	80	—	—	20	—	—	—	1070～1160	—	1170～1200	中温强度高，耐腐蚀性，抗氧化性，润湿性等性能优异，接头塑性好；与 Ag90Pd 相比，在强度和润湿性方面得到进一步提高
Ag95 Pd	95	—	—	5	—	—	—	970～1010	—	1015～1100	为了降低成本而使用的一种焊料，性能与 Ag80Pd、Ag90Pd 接近
Ag10 CuZn	10	53	37	—	—	—	—	815～850	—	850～950	含银量低，价格较低，但是熔点偏高，铺展性和塑性较差，应用范围小，主要用于钎焊铜、铜合金、钢和硬质合金
Ag25 CuZn	25	40	35	—	—	—	—	745～775	—	780～850	比 Ag10CuZn 的银含量提高 15%，因此熔点明显降低，铺展性能得到改善，钎缝比较光洁，常应用于钎焊铜以及铜合金、钢以及不锈钢
Ag45 CuZn	45	30	25	—	—	—	—	660～725	386	730～800	熔点低，良好的铺展性能和填缝能力，钎缝表面光洁，接头强度高，耐冲击载荷能力也很好，是最常用的焊料
Ag50 CuZn	50	34	16	—	—	—	—	690～775	343	780～850	润湿性优良，接头可承受多次冲击载荷；常制成箔片状使用，可用于焊钎铜、铜合金和钢等
Ag65 CuZn	65	20	15	—	—	—	—	685～720	384	720～800	银含量较高，熔点低，润湿性良好、钎缝表面光洁，接头强度和塑性高，常用于食品器皿、带锯、仪表及波导等产品的钎焊
Ag70 CuZn	70	26	4	—	—	—	—	815～850	451	850～950	银量高，导电性好，接头具有高强度和塑性。适用于铜、黄铜及银的钎焊，并常用于钎焊引线及其他要求高导电性的零部件

续表

型 号	化学成分①（%）							熔化温度（℃）	抗拉强度（MPa）	钎焊温度（℃）	特点及用途
	Ag	Cu	Zn	Pd	Mn	Ni	其他				
Ag56 CuNi	56	42	—	—	—	2	—	790～830	313	830～900	加入镍，焊料的熔点上升，但润湿铺展能力大幅提高；钎焊接头的强度和塑性都优于银铜焊料，可用于钎焊强度较高的低合金钢、不锈钢、钛以及钛合金
Ag63 CuNi	63	32	—	—	—	5	—	785～820	313	840～905	
Ag77 CuNi	77	20	—	—	—	3	—	780～820	313	820～880	
Ag52 CuPd	52	28	—	20	—	—	—	875～900	—	910～1020	银铜钯三元合金系焊料的性能与银钯焊料相近，但熔化温度要低一些；对不锈钢的润湿性能好，并且其钎焊温度与不锈钢的热处理温度相适应。该焊料广泛用于陶瓷与金属的钎焊。该系焊料中，以Ag54CuPd的综合性能最好，主要用于航空发动机部件的连接，以代替金镍焊料来钎焊工作温度不超过400℃的组件
Ag54 CuPd	52	25	—	21	—	—	—	900～950	—	960～1050	
Ag58 CuPd	58	32	—	10	—	—	—	825～850	—	860～950	
Ag65 CuPd	65	20	—	15	—	—	—	859～900	—	910～1020	
Ag68 CuPd	68	22	—	10	—	—	—	830～860	—	880～950	
Ag69 CuPd	69	26	—	5	—	—	—	805～810	—	850～920	
Ag60 CuIn	60	30	—	—	—	—	In10	600～720	—	750～820	由于加入In元素，焊料的熔点较低，但凝固温度区间较大，钎焊时需要快速加热以避免焊料偏析；镉的蒸汽压极低，适合于真空受静力的器件，特别是α型和α+β型钛合金的钎焊；在电子工业中被广泛用作为电真空器件的末级钎焊用焊料
Ag61 CuIn	61	24	—	—	—	—	In15	625～705	—	730～800	
Ag63 CuIn	63	27	—	—	—	—	In10	660～730	—	800～900	
AgCu30 ZnIn	余量	30	25				In5	635～715	—	715～780	
AgCu34 ZnIn	余量	35	30				In1	660～740	—	740～800	
AgCu40 ZnIn	余量	38	27				In5	640～755	—	755～810	
Ag92 Cu Li	余量	7	—	—	—	—	Li0.4	779～880	—	890～950	因含有Li而具有自钎剂作用，钎焊时可不用钎剂
Ag72 Cu Li	余量	28	—	—	—	—	Li0.4	766～780	—	766～871	
Ag72 CuNi Li	余量	27	—	—	—	—	Li0.5	780～800	—	800～850	
Ag43 CuSn	余量	32	—	—	—	—	Sn25	540～570	—	585～620	对钢和镍的润湿性优异，但强度低，脆性大，Ag43CuSn焊料的熔点较低，可在600℃以下进行钎焊，多用于受静载的接头
Ag63 CuSn	余量	27	—	—	—	—	Sn10	600～780	—	780～850	
Ag68 CuSn	68	27	—	—	—	—	Sn 5	604～730	—	730～800	
Ag64 PdMn	64	—	—	3	33	—	—	1120～1170	—	1170～1200	熔点高，高温性能好，可用于钎焊工作温度在600～700℃的零件，特别是Ag64PdMn焊料钎焊件的工作温度可达到800℃；但这类焊料的钎缝在高温下长期工作时会发生成分偏析，从而降低接头的力学性能。这类焊料多用于航空航天发动机的中温高强度部件的钎焊
Ag75 PdMn	75	—	—	5	20	—	—	1071～1121	—	1150～1200	

续表

型 号	化学成分①（%）							熔化温度（℃）	抗拉强度（MPa）	钎焊温度（℃）	特点及用途
	Ag	Cu	Zn	Pd	Mn	Ni	其他				
Ag63 CuSn—Ni	63	29	—	—	—	3	Sn5	780～800	—	800～890	此焊料是在 Ag—Cu—Ni 的基础上加入 5%锡，使焊料的熔点进一步降低，而性能无明显差异。但焊料的润湿性和流动性下降，钎焊时要考虑适当增加保温时间
Ag65 CuMnNi	65	28	—	—	5	2	—	780～825	—	850～950	由于 Mn 和 Ni 的含量大，焊料的润湿性能得到显著提高，在硬质合金上具有良好的流动性，高温强度高，可用于钎焊奥氏体不锈钢和沉淀硬化型高温合金。Ni 的质量分数为 5%，可降低焊料的裂纹腐蚀倾向，特别是对马氏体型不锈钢，可在边缘处形成富镍层，从而避免裂纹腐蚀。这种焊料主要用于钎焊发动机不锈钢零件
Ag18 CuZn Sn	18	46	34	—	—	—	Sn2	780～810	—	820～900	银铜锌锡焊料主要是在银铜锌焊料中加入 Sn 来代替 Cd。但为避免焊料的塑性明显下降，Sn 的加入量不能过高。Ag56CuZnSn 是一种通用型无 Cd 银焊料，性能与 Ag50CdZnSn 焊料相当，但 Ag 含量较高，可代替含 Cd 焊料用于铜合金、钢和不锈钢等的钎焊，接头力学性能优良。Ag30CuZnSn 的性能和 Ag45CuZnSn、Ag50CuZnSn 的性能相当，但含银量要低得多，经济性好，可用于铜、铜合金，钢和不锈钢的钎焊；向 Ag56CuZnSn 中加入少量的 P 可进一步降低焊料的熔点，但因 P 的存在，主要用于钎焊加热温度不高的铜及铜合金
Ag30 CuZn Sn	30	36	22	—	—	—	Sn2	710～760	—	710～770	
Ag34 CuZn Sn	34	28	27	—	—	—	Sn3	720～730	—	760～850	
Ag56 CuZn Sn	56	22	17	—	—	—	Sn5	620～650	—	670～750	
Ag56 CuZn SnP	56	22	17	—	—	—	Sn5P 0.5	565～610	—	615～685	
Ag40 CuZn Sn Ni	40	25	31	—	—	—	Sn 3	630～640	—	650～750	在银铜锌锡中加入少量的 Ni 可以提高焊料的强度、耐热性和耐腐蚀性，并改善焊料的润湿性，而熔点仍然较低，可替代 Ag50ZnCu 焊料用于铜以及不锈钢的钎焊
Ag50 CuZn Sn Ni	50	21	27	—	—	—	Sn 1	650～670	—	670～750	
Ag54 CuZn Sn Ni	54	23	17	—	—	—	Sn 7	610～660	—	670～750	
Ag54 CuZnNi	54	40	5	—	—	1	—	720～860	323	870～970	焊料中 Zn 和 Ni 含量均不多，熔点较高，钎焊接头的耐热性和耐腐蚀性好，但焊料的铺展性较差；由于该合金中挥发性元素含量较低，适合于炉中钎焊
Ag58 CuZnNi	58	18	19	—	—	5	—	690～710	—	720～800	焊料中 Zn 和 Ni 含量较高，熔点低，凝固区间小，并具有良好的润湿铺展性能，适用于不锈钢的钎焊
Ag20 CuZnMn	20	40	35	—	5	—	—	740～790	—	800～890	
Ag49 CuZnMn Ni	49	10	33	—	7	1	—	625～705	—	715～775	

① 质量分数。

参 考 文 献

[1] GB/T 8320—2003. 铜钨及银钨电触头[S]. 北京：中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局发布，2003.

[2] CUWODUR Contact Materials and Contact Components for medium and hign-tension switchgear CODUCO Company[Z].

[3] Electrical Contact：Principles and Applications Paul G. Slade Marcel Dekker Inc. New York. 1999.

[4] Tungsten based contact materials[Z]. PLANSEE.

[5] W. Merl，C. L. Meyer，E. Ataya. DoDuCo 电触头数据集[M]. 上海：上海科学技术文献出版社.

[6] 吴文安，梁殿清，肖春林，苗晓丹. 氮气氛烧结 CuW/Cu 触头材料结合强度的研究[J]. 电工材料，2004，2.

[7] 吴文安，梁殿清，肖春林，苗晓丹. CuW/CrCu 触头材料抗拉强度的研究[J]. 电工材料，2003.

[8] 范志康，梁淑华，肖鹏. CuW/CrCu 自立型整体触头界没还原及结合强度[J]. 电工材料，2003.

[9] 范志康，梁淑华，肖鹏. 国内外铜钨高压电触头的研究现状[C]. 第四届电工合金技术交流会，2004.

[10] 中国材料工程大典编辑委员会. 中国材料工程大典：第·14 卷，粉末冶金材料工程[M]. 北京：化学工业出版社，2005.

[11] 干福熹. 信息材料[M]. 天津：天津大学出版社，2000.

[12] 中国材料工程大典编辑委员会. 中国材料工程大典第 5 卷，有色金属材料工程(下)[M]. 北京：化学工业出版社，2005.

[13] 电工材料应用手册编辑委员会. 电工材料应用手册[M]. 北京：机械工业出版社，1999.

[14] 杜作娟，杨天足，古映莹，邱晓勇. AgSnO 电触点材料制备方法进展[J]. 材料导报，2005，2.

[15] 张尧卿，郑冀. AgSnO2 电接触材料研究概述[J]. 材料导报，2006，4.

[16] 张燕，王俊勃，李英民，陈立成，杨敏鸽，丁秉钧. AgSnO 触头材料及其添加剂的研究与发展[J]. 材料导报，2005，5.

[17] 马战红，陈敬超，周晓龙，张剑平. 银基电触头产品的发展状况[J]. 昆明理工大学学报，2002，2.

[18] 曹曙光，谢明，陈力，陈江，宁德魁，曾荣川，杨有才，黎玉盛，张健康，刘莉 . 稀土元素在银氧化锡触头材料中作用的研究[J]. 贵金属. 2005，1.

[19] 王家真，王亚军，杨志懋，王伟，丁秉钧. CuO 添加剂对 Ag/SnO_2 润湿性与界面特性的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2005，3.

[20] 荣命哲，鲍芒，万江文. 银金属氧化物(AgMeO)触头电弧侵蚀特性研究[J]. 电工技术学报，1997，4.

[21] 王尚军，凌国平，孟亮. 湿化学法制备纳米 $AgSnO_2$ 复合粉末的研究[J]. 浙江大学学报工学版，2005，11.

[22] 刘辉，戚颖，谭光讯，覃向忠，贺国良. 新型银氧化锡触头材料在汽车电器中的应用[J]. 汽车电器，2001，1.

[23] 张传中. 一种新压电材料—类石英晶体 $GaPO_4$[J]，压电与声光. 1999，21(1)：64-67.

[24] 熊兆贤. 材料物理导论[M]. 北京：科学出版社，2001.

[25] 张福学，王丽坤. 现代压电学(中册)[M]. 北京：科学出版社，2002.

[26] 杨大智. 智能材料与智能系统[M]. 天津：天津大学出版社，2001.

[27] Gene H. Haertling. Ferroelectric Ceramics：History and technology[J]. Journal of the American Ceramic Society. 1998，82(4)：797-818.

[28] 田蔚. 铁电材料研究进展及其在飞行器上的应用[J]. 航空学报，2000，21：6-10.

[29] 于向阳，程继健，周欣山，田长生. 弛豫铁电陶瓷有序—无序结构对其相组成和介电性能的影响[J]. 功能材料，2000，1.

[30] Donald Forst，Jie Fang Li，ZhengkuiXu. incommensurately modulated polar structure in antiferroelectric tin-modified lead zirconate titanate：2dependence of structure-propetty relations on tie content[J]. Journal of thg American Ceramic Society. 1998，81(9)：2225-2236.

[31] 孙剑，吴嘉达，应质峰，等 氮化铝薄膜的低温沉积[J]. 半导体学报，2000，21(9)：914-917.

[32] 张鲁殷，胡晓君. 铁电薄膜的制备及其在器件中的应用[J]. 山东科技大学学报，2002，21(2)：14-16.

[33] 刘梅冬，曾亦可，李楚容，等. 铁电薄膜的制备及应用技术研究[J]. 材料导报，2000，12：47-49.

[34] Jones，R. E. Jr. ，et al . Thin Solid Films. 1995，(1-2)：584-588.

[35] 朱信华，刘治国，铁电薄膜、多层膜及异质结构研究[J] 物理. 1999，28(2)：68-73.

[36] Tressler J. F，Alkoy S. ，Dogan A. ，et al. Composites. [J]：Part A，1999，30，477.

[37] J Fousek，L E Cross，D B Litvin. Possible piezoelectric composites based on the flexoelectric effect[J]. Materials Leters，1999(39)：287-291.

[38] 熊兆贤，等. 无机材料研究方法[M]. 厦门：厦门大学出版社，2001.

[39] K. L. Ng，H. L. Wa，C. L. Choy. Piezoelectric and Pyrooelectric Properties of PZT/P(VDF-TrFE) Composites with Constituent Phases Poled in Parallelor Antiparallel Directions[J]. IEEE Trans. U FFC ，2000，47(6)：1308-1315.

[40] 彭智，张兴元. 钛酸铅与偏氟乙烯——三氟乙烯共聚物形成的铁电复合物相变过程的热释电研究[J]. 化学物理学报. 2000，13 (3)：369-370.

[41] 《中国材料工程大典型》编辑委员会. 中国材料工程大典：第 22 卷，材料焊接工程. 第 1 版[M]. 北京：化学工业出版社，2006.

[42] 薛松柏，栗卓新，朱颖，樊丁. 焊接材料手册，第 1 版[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

[43] 张子荣，时炜. 简明焊接材料选用手册，第 2 版[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[44] 方洪渊. 简明钎焊工手册，第 1 版[M]. 北京：机械工业出版社，2000.

[45] 顾小龙，杨倡进. 抗氧化无铅焊料[P]. 中国. ZL03129619. X. 2004.

[46] 李致焕，李华霖，张勐宁. 电气工程中的焊接技术与应用. 第 1 版[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

[47] 张启运，庄鸿寿. 钎焊手册. 第 1 版[M]. 北京：机械工业出版社，1999.

[48] 吴懿平，丁汉. 电子制造技术基础. 第 1 版[M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[49] 菅沼克昭，宁晓山(译). 无铅焊接技术. 第 1 版[M]. 北京：科学出版社，2004.

[50] 张文典. 实用表面组装技术. 第 2 版[M]. 北京：电子工业出版社，2006.

[51] Mulugeta Abtewa, Guna Selvaduray. Lead-free Solders in Microelectronics[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 27(1): 95-141.

[52] John H. L. Pang, B. S. Xiong, T. H. Low. Low cycle fatigue study of lead free 99. 3Sn－0. 7Cu solder alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(5): 865－872.

[53] 周甘宇，王长振，谭维，章四琪. 无铅焊锡的研究进展[J]. 材料导报，2003，17(8)：25-27.

[54] 杜长华，陈方，杜云飞. Sn—Cu、Sn—Ag—Cu 系无铅钎料的钎焊特性研究[J]. 电子元件与材料，2004，23(11)：34-36.

[55] 廖福平，黄惠珍，周浪. Sn-9Zn/Cu 焊点的结合强度与抗蠕变性能[J]. 电子工艺技术，2005，26(6)：330-333.

[56] K. Zeng, K. N. Tu. Six cases of reliability study of Pb－free solder joints in electronics packaging technology[J]. Materials Science and Engineering, 2002, 38(1): 55-105.

[57] J. Villain, O. S. Brueller, T. Qasim. Creep behaviour of lead free and lead containing solder materials at high homologous temperatures with regard to small solder volumes[J]. Sensors and Actuators, 2002, 99(1): 194-197.

[58] K. Narayan Prabhu, Rantej Bali, Rajat Ranjan. Effect of substrate surface texture and flux coating on the evolution of microstructure during solidification of lead free Sn－3. 5Ag solder alloy[J]. Materials and Design, 2004, 25(2): 447-449.

[59] 常俊玲，刘晓庆，谢晓明. SnAgCu(SnPb)/Ni 和 SnAgCu(SnPb)/Cu 界面金属间化合物在热冲击过程中的生长规律[J]. 功能材料与器件学报，2005，11(4)：445-450.

[60] J. Zhao, Y. Miyashita, Y. Mutoh. Fatigue crack growth behavior of 96. 5Sn－3. 5Ag lead-free solder [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(4): 723-731.

[61] John H. L. Pang, B. S. Xiong, T. H. Low. Low cycle fatigue models for lead-free solders[J]. Thin Solid Films, 2004, 462-463(2): 408-412.

第5篇 电线电缆

主编单位：上海电缆研究所

主　　编：邓长胜　张兆焕

编写人员：王春江　庄　猛　宗曦华　张秀松　黄豪士
陈惠民　高　欢　（上海电缆研究所）

第 1 章　电力电缆及其附件

电力电缆的功能是在电力系统中传送和分配电能。电力电缆是一种可靠的全绝缘产品，使用期一般要求在 40 年以上，对于某些工程配套用电力电缆，若设备大修期限不到 15 年，可考虑更换电缆，此时电缆使用寿命可考虑为不低于 20 年。电力电缆具有下列优点：

（1）一般敷设于土壤中或敷设于室内、沟道、隧道中。不需要用杆塔，占地少。

（2）与架空线相比，电缆受气候条件相关的周围环境影响小，传输性能稳定，中、低压线路可较少维护，安全性较高。

（3）有条件向超高压、大容量、横跨海峡等重大输电工程发展。

（4）现代高温（液氮温度）超导电力电缆，除输电外还可为其他新技术领域应用。

电力电缆有 100 多年的技术发展史，在发展过程中发明了许多品种，如：中低压电缆（一般指 35kV 及以下）有黏性油浸纸绝缘电缆、不滴流油浸纸绝缘电缆、聚氯乙烯绝缘电缆、聚乙烯绝缘电缆、交联聚乙烯绝缘电缆、天然橡胶绝缘电线、丁基橡胶绝缘电缆和乙丙橡胶绝缘电缆等；高压电缆（一般为 110kV 及以上）有自容式充油电缆、钢管充油电缆、充气电缆、压气电缆、交联聚乙烯绝缘电缆和乙丙橡胶绝缘电缆等。近年来，中、低压和高压范围内发展较快地是交联聚乙烯绝缘电缆，并积极开发海底交联聚乙烯绝缘电缆，而油浸纸绝缘电缆基本被淘汰，充油电缆数量也大为减少。电力电缆绝大多数用于城市电网、发电站引接线路，工矿和企业内部供电线路，并且电压等级以 10kV 及以下居多。近年来随着使用要求的提高，阻水电力电缆、阻燃电力电缆、耐火电力电缆和其他特种电力电缆相继迅速发展，电力电缆的品种也日新月异。

电力电缆的额定连续负荷载流量（100％负荷因素）是一项重要的使用参数，它与电缆额定温度、环境温度、敷设条件等有关。载流量计算方法国际上已规范化，如 IEC－60287 标准及其修改文件，我国已等同采用。为使用方便，本章列出了常用电力电缆的载流量参考选用表，选用这些数据基本上是安全的。

电力电缆附件分为电缆终端和电缆连接两大主体，是电缆线路中不可缺少的组成部分，其结构设计一方面需配合电缆结构的要求，另一方面又必须满足使用条件的要求，所以附件的技术难度实际上高于电缆本体。从过去事故发生率统计，附件故障率超过电缆本体。附件本身也是一个整体，由各种零件组成，包括制作过程中的加工工艺。附件的结构主要包括导体连接件、内绝缘结构件、必要的绝缘浇注剂、外绝缘结构件和其他外部保护构件。这些部件总装和施工成附件后，在总体上应满足使用条件提出的电气、机械、理化性能和其他特殊要求，由此可见附件的设计应具有全面完整的技术思路。电力电缆附件随着电缆改进而发展，我国油浸纸绝缘电缆已不生产，所以铸铁外壳加浇注剂电缆附件也基本淘汰。大力推广挤包绝缘电缆后，目前以热收缩型、冷收缩型和各种预制型附件为主流产品。

电缆及其附件在运行中除能长期承受电网的工作电压外，还经常遇到各种过电压，如操作过电压，大气过电压和故障过电压等。此外应满足敷设和运行中对机械性能、弯曲性能和防腐蚀性能等要求。电缆和附件的设计能否满足这些要求，通常通过型式试验来给予判定。

1　中低压电力电缆的基本结构

导体、绝缘、半导电层屏蔽（电场屏蔽）、金属屏蔽（导引电流）、层垫（或内护套）、铠装、护套（或外护层）是电力电缆的基本组成部分。但根据电缆参数和使用条件的区别，电缆不一定必需包含以上所有组成部分。

1.1　导体

电力电缆的导电线芯采用 GB/T 3956—1997《电缆的导体》标准，该标准规定了多种导体结构，电力电缆的导电线芯选用了其中的第 1 种实心导体、第 2 种圆形绞合导体、第 5 种软铜导体和第 6 种更软的铜导体，其单线直径比第 5 种更细。前两种适用于固定敷设，第 5 种可移动使用，第 6 种可频繁移动使用，但电力电缆大部分选用第 2 种结构。电力电缆导体的结构和电阻要求见表 5.1-1 和表 5.1-2。第 2 种导体一般采用正规绞合，自里向外，每层单线数递增 6 根，每层绞向相反，如 19 根单线组成的导体，由 1＋6＋12 根单线绞成。第 5 种和第 6 种导体，因单线根数很多，通常采用束线绞合，必要时采用复合绞合。表 5.1-1 中“不镀金属”是指光亮退火铜线，“镀金属”一般是指镀锡铜线。“成型导体”是指扇形、矩形和半圆形等导体，仅为部分中低压电缆采用。表 5.1-1 和表 5.1-2 的规定，并不包括所有电力电缆品种的导体结构，某些产品的导体结构自成系列。由于 GB/T 3956—1997 包含了电气装备电缆用导体，有些规格不用于固定敷设电力电缆，所以在表 5.1-1 和表 5.1-2 中不包括这些规格。此外电力电缆很少用第 5 种和第 6 种铜软导体，需要时可查阅第 5 章。

关于导体的典型结构可参考表 5.1-3～表 5.1-6。为了降低大截面导体的集肤效应损耗，可采用分割导体，将圆形导体分成 4 个或 6 个扇形导体，各扇形导体之间用绝缘纸带隔离，此举可有效地降低导体的交流电流损耗。自容式充油电缆的导体由制造厂自行设计，不强调统一规定结构。

导体电阻会影响载流量，导体温度不等于 20℃时的电阻测量值，需乘以表 5.1-7 系数 k 校正。

表 5.1-1　单芯和多芯电缆用第 1 种实心导体

标称截面（mm²）	20℃时导体最大电阻（Ω/km）		
	圆铜导体		圆或成形铝导体
	不镀金属	镀金属	
1.5	12.1	12.2	—
2.5	7.41	7.56	12.1
4	4.61	4.70	7.41
6	3.08	3.11	4.61
10	1.83	1.84	3.08
16	1.15	1.16	1.91
25	0.727	—	1.20
35	0.524	—	0.868
50	0.387	—	0.641

表 5.1-2 单芯和多芯电缆用第2种绞合导体

标称截面（mm²）	导体中单线最少根数						20℃时导体最大电阻（Ω/km）		
	非紧压圆形导体		紧压圆形导体		非圆形导体		铜		铝
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	不镀金属	镀金属	
1.5	7	—	6	—	—	—	12.1	12.2	—
2.5	7	—	6	—	—	—	7.41	7.56	—
4	7	7	6	—	—	—	4.61	4.70	7.41
6	7	7	6	—	—	—	3.08	3.11	4.61
10	7	7	6	—	—	—	1.83	1.84	3.08
16	7	7	6	6	—	—	1.15	1.16	1.91
25	7	7	6	6	6	6	0.727	0.734	1.20
35	7	7	6	6	6	6	0.524	0.529	0.868
50	19	19	6	6	6	6	0.387	0.391	0.641
70	19	19	12	12	12	12	0.268	0.270	0.443
95	19	19	15	15	15	15	0.193	0.195	0.320
120	37	37	18	15	18	18	0.153	0.154	0.253
150	37	37	18	15	18	18	0.124	0.126	0.206
185	37	37	30	30	30	30	0.099 1	0.100	0.164
240	61	61	34	30	34	34	0.075 4	0.076 2	0.125
300	61	61	34	30	34	34	0.060 1	0.060 7	0.100
400	61	61	53	53	53	53	0.047 0	0.047 5	0.077 8
500	61	61	53	53	53	53	0.036 6	0.036 9	0.060 5
630	91	91	53	53	53	53	0.028 3	0.028 6	0.046 9
800	91	91	53	53	—	—	0.022 1	0.022 4	0.036 7
1000	91	91	53	53	—	—	0.017 6	0.017 7	0.029 1

表 5.1-3 圆形导体的典型结构排列方式

导体标称截面（mm²）	导体计算截面（mm²）	导体结构		导体直径（mm）
		根数/直径（mm）	排列方式	
2.5	2.43	1/1.76	1	1.76
4	3.9	1/2.23	1	2.23
6	5.85	1/2.73	1	2.73
10	9.73	1/3.52	1	3.52
16	15.55	1/4.45	1	4.45
25	24.25	7/2.10	1+6	6.30
35	33.95	7/2.49	1+6	7.47
50	48.5	19/1.81	1+6+12	9.05
70	67.9	19/2.14	1+6+12	10.70
95	92.15	19/2.49	1+6+12	12.45
120	116.4	19/2.28	1+6+12	14.00
150	145.5	19/3.13	1+6+12	15.65
185	179.5	37/2.49	1+6+12+18	17.73
240	232.8	37/2.83	1+6+12+18	19.81
300	291.0	37/3.17	1+6+12+18	22.19
400	388.0	37/3.66	1+6+12+18	25.62
500	485.6	61/3.18	1+6+12+18+24	28.62
630	606.0	61/3.56	1+6+12+18+24	32.04
800	776.0	91/3.30	1+6+12+18+24+30	36.30

表 5.1-4 两芯电缆半圆形导体的典型结构排列方式

导体标称截面（mm²）	导体结构		扇形高度（mm）
	根数/直径（mm）	排列方式	
25	20/1.28	7+13	4.2
35	20/1.51	7+13	5.0
50	20/1.80	7+13	6.0
70	20/2.13	7+13	7.2
95	24/2.25	7+2+15	8.5
120	24/2.53	7+2+15	9.6
150	45/2.07	7+2+15+21	10.9

表 5.1-5 3芯电缆扇形导体的典型结构排列方式

导体标称截面（mm²）	导体结构		扇形高度（mm）
	根数/直径（mm）	排列方式	
25	18/1.35	6+12	4.9
25	单根实心导体	1	4.6
35	18/1.59	6+12	5.8
35	单根实心导体	1	5.5
50	18/1.90	6+12	7.0
70	18/2.25	6+12	8.3
95	18/2.62	6+12	9.8
95	9/2.32+15/2.14	7+2+15	9.8
120	9/2.62+15/2.40	7+2+15	11.2
150	45/2.07	7+2+15+21	12.8
185	45/2.29	7+2+15+21	14.2
240	45/2.62	7+2+15+21	16.4

表 5.1-6 4芯电缆扇形导体的典型结构排列方式

导体标称截面（mm²）	导体结构					
	主线芯			中线芯		
主线芯+中线芯	根数/直径（mm）	排列方式	扇形高度（mm）	根数/直径（mm）	排列方式	扇形高度（mm）
3×25+1×10	18/1.34	6+12	5.3	1/3.52	—	3.52
3×35+1×10	18/1.59	6+12	6.5	1/3.52	—	3.52
3×50+1×16	18/1.90	6+12	7.7	1/4.45	—	4.45
3×70+1×25	18/2.25	6+12	9.2	18/1.34	6+12	6.4
3×95+1×35	9/2.32+16/2.14	7+2+16	11.0	18/1.59	6+12	7.9
3×120+1×35	9/2.62+16/2.40	7+2+16	12.4	7/2.1	1+6	7.9
3×150+1×50	45/2.07	7+2+15+21	13.4	19/1.81	1+6+12	7.7
3×185+1×50	45/2.29	7+2+15+21	15.2	19/1.81	1+6+12	7.7

注 根据用户要求，其他规格需另行设计。

表 5.1-7 铜、铝电阻温度校正系数

测量时温度（℃）	校正系数 k	测量时温度（℃）	校正系数 k
5	1.064	21	0.996
6	1.059	22	0.992
7	1.055	23	0.988
8	1.050	24	0.984
9	1.046	25	0.980
10	1.042	26	0.977
11	1.037	27	0.973
12	1.033	28	0.969
13	1.029	29	0.965
14	1.025	30	0.962
15	1.020	31	0.958
16	1.016	32	0.954
17	1.012	33	0.951
18	1.008	34	0.947
19	1.004	35	0.943
20	1.000	—	—

1.2　绝缘

1.2.1　挤包塑料或橡胶绝缘电缆

挤包塑料或橡胶绝缘电缆所用绝缘材料虽然品种众多，实际上最常用的是聚氯乙烯、交联聚乙烯和乙丙橡胶，这几种材料的绝缘厚度见表 5.1-8～表 5.1-10。当采用其他高分子材料时，可根据材料的相似性，参考确定绝缘厚度尺寸。高分子材料仍有微量的吸水性，在低压范围内不影响电缆正常工作，在中压范围内，微量水分会引发绝缘内产生水树，久而久之导致绝缘击穿。抗水树交联聚乙烯绝缘能延缓水树的滋生，有可能大量应用。高压范围内应采用高纯度绝缘料，为防止吸收微量水分，高压电缆和海底电缆均需有密封金属护套。

表 5.1-8　聚氯乙烯（PVC）绝缘标称厚度

导体标称截面（mm²）	额定电压 U_0/U（kV）下的绝缘标称厚度（mm）		
	0.6/1 PVC/A	1.8/3 PVC/A	3.6/6 PVC/B
1.5，2.5	0.8	—	—
4，6	1.0	—	—
10，16	1.0	2.2	
25，35	1.2	2.2	
50，70	1.4	2.2	
95，120	1.6	2.2	
150	1.8	2.2	
185	2.0	2.2	3.4
240	2.2	2.2	
300	2.4	2.4	
400	2.6	2.6	
500～800	2.8	2.8	
1000	3.0	3.0	

表 5.1-9　交联聚乙烯（XLPE）绝缘标称厚度

导体标称截面（mm²）	额定电压 U_0/U（kV）下的绝缘标称厚度（mm）								
	0.6/1	1.8/3	3.6/6	6/6 6/10	8.7/10 8.7/15	12/20	18/30	21/35	26/35
1.5,2.5	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—
4，6	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—
10	0.7	2.0	2.5	—	—	—	—	—	—
16	0.7	2.0	2.5	3.4	—	—	—	—	—
25，35	0.9	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	—	—	—
50	1.0	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
70，95	1.1	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
120	1.2	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
150	1.4	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
185	1.6	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
240	1.7	2.0	2.6	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
300	1.8	2.0	2.8	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
400	2.0	2.0	3.0	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
500	2.2	2.2	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
630	2.4	2.4	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
800	2.6	2.6	3.2	3.4	4/5	5.5	8.0	9.3	10.5
1000	2.8	2.8	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5

表 5.1-10　乙丙橡胶（EPR）和硬乙丙橡胶（HEPR）绝缘标称厚度

标称截面（mm²）	额定电压 U_0/U（kV）下的绝缘标称厚度（mm）											
	0.6/1		1.8/3		3.6/6		6/6 6/10	8.7/10 8.7/15	12/20	18/30	21/35	26/35
	EPR	HEPR	EPR	HEPR	无屏蔽	有屏蔽						
1.5，2.5	1.0	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4，6	1.0	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	1.0	0.7	2.2	2.0	3.0	2.5	—	—	—	—	—	—
16	1.0	0.7	2.2	2.0	3.0	2.5	3.4	—	—	—	—	—
25	1.2	0.9	2.2	2.0	3.0	2.5	3.4	4.5	—	—	—	—
35	1.2	0.9	2.2	2.0	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	—	—	—
50	1.4	1.0	2.2	2.0	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
70	1.4	1.1	2.2	2.0	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
95	1.6	1.1	2.4	2.0	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
120	1.6	1.2	2.4	2.0	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
150	1.8	1.4	2.4	2.0	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
185	2.0	1.6	2.4	2.0	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
240	2.2	1.7	2.4	2.0	3.0	2.6	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
300	2.4	1.8	2.4	2.0	3.0	2.8	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
400	2.6	2.0	2.6	2.0	3.0	3.0	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
500	2.8	2.2	2.8	2.2	3.2	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
630	2.8	2.4	2.8	2.4	3.2	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
800	2.8	2.6	2.8	2.6	3.2	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5
1000	3.0	2.8	3.0	2.8	3.2	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5

1.2.2 黏性油浸纸绝缘和不滴流油浸纸绝缘

黏性油浸纸绝缘和不滴流油浸纸电缆是属于同一类型的组合绝缘材料，前者浸渍剂的主要成分为光亮油和松香，后者的主要成分为光亮油、松香和高滴点微晶蜡。黏性油浸纸绝缘在充分浸油的情况下，具有优良的耐电击穿性能，可用于35kV及以下电缆。但是黏性油在工作温度下有一定的流动性，当电缆有落差敷设时，高端绝缘中的油会渐渐流失，从而降低电气性能，所以敷设落差受到限制。不滴流油浸纸绝缘在工作温度下基本上不流动，所以敷设落差不受限制，电气性能稳定。但是不滴流油从液体变成半固体时，由于收缩使绝缘中存在微孔，因此耐电击穿性能稍低，仅适合用于6～10kV电缆。油浸纸绝缘是易吸水材料，因此必须有密封的金属护套。油浸纸绝缘电缆绝缘厚度见表5.1-11和表5.1-12。表中的芯绝缘指导体外绕包的纸绝缘；带绝缘指多个绝缘芯绞合成缆后绕包的纸绝缘。

1.2.3 自容式充油电缆的浸渍纸绝缘

充油电缆的绝缘由高性能低黏度油浸纸组成，电缆纸的厚度较薄，介质损耗正切较小，并有压力供油系统，以保证绝缘始终能保持充分浸油状态，因此具有十分优良的电气性能。电缆设计电场强度较高。电压等级为110～750kV。影响超高压电缆传输容量的重要因素之一是绝缘纸的介质损耗，当设计电压达到1000kV时，油纸损耗已使传输容量得不偿失，因此开发了低损耗的聚丙烯薄膜和木纤维复合纸(即PPLP纸)，其中聚丙烯薄膜厚度比例为30%～50%，但并未大批应用。自容式充油电缆绝缘厚度见表5.1-13。

表5.1-11 单芯和分相铅包油纸电缆绝缘厚度

额定电压 U_0/U (kV)	标称截面 (mm^2)	绝缘厚度 (mm)	
		最 小	标 称
0.6/1	25～70	1.2	1.4
	95～120	1.3	1.5
	150～185	1.4	1.6
	240	1.6	1.8
	300	1.7	1.9
	400	1.8	2.0
	500～1000	2.0	2.2
1.8/3	50～300	1.8	2.9
	400	1.9	2.1
	500～1000	2.0	2.2
3/3、3.6/6	50～1000	2.4	2.6
6/6、6/10	50～1000	2.8	2.9
8.7/10、8.7/15	50～1000	3.6	3.8
12/20	50～1000	4.7	5.0
18/20	35	7.5	7.9
	50	7.0	7.4
	70～1000	6.7	7.1
21/35	50	8.7	9.1
	70	8.2	8.6
	95～1000	8.1	8.5
26/35	50	11.0	11.4
	70	10.1	10.5
	95	9.9	10.3
	120～1000	9.7	10.1

表5.1-12 多芯油浸纸电缆绝缘厚度

额定电压 U_0/U (kV)	标称截面 (mm^2)	芯绝缘 (mm)		带绝缘 (mm)	
		最小	标称	最小	标称
0.6/1	16	0.6 (0.6)	0.7 (0.7)	0.4	0.5
	25～120	0.7 (0.7)	0.8 (0.8)	0.5	0.6
	150～185	0.9 (1.0)	1.0 (1.1)	0.5	0.6
	240～400	1.0	1.1	0.6	0.7
1.8/3	25～400	1.2	1.3	0.6	0.7
3/3	25～400	1.2	1.3	0.9	1.0
3.6/6	25～400	2.1	2.2	0.6	0.7
6/6	25～400	2.1	2.2	1.0	1.1
6/10	25～400	2.7	2.9	0.4	0.4
8.7/10	25～400	2.7	2.9	1.2	1.3

表5.1-13 充油电缆油道内径和绝缘厚度

额定电压 (kV)	截面范围 (mm^2)	油道内径① (mm)	支撑带厚度 (mm)	绝缘厚度 (mm)
110	240～2000	12	0.8	10.5
220	300～2000	12	0.8	19.0
330	400～1600	12	0.8	25.0
500	680 (试制品)	12	0.8	31.0

① 根据供油区间的长度，油道可采用更大的直径。

1.3 屏蔽

1.3.1 半导电层屏蔽(电场屏蔽)

通常3.6/6kV及以上的电缆需要有半导电层屏蔽。挤包导体屏蔽层与绝缘层之间、挤包绝缘屏蔽层与绝缘层之间形成比较光滑的界面，可改善电场分布。一方面能适度降低绞合导体凹凸部分的最大电场强度，另一方面半导电屏蔽层与绝缘层能紧密贴合，可防止电缆冷热循环过程中产生气隙、抑制局部放电、延长电缆使用寿命。对于较大截面导体外面，先绕包一层有弹性的半导电尼龙编织带，然后挤包半导电屏蔽层，同时在挤包半导电绝缘屏蔽层外也绕包这种半导电尼龙编织带。中压电缆的挤包导体屏蔽层厚度一般控制在1.0mm以下，挤包的绝缘屏蔽层厚度一般控制在1.0mm左右。

纸绝缘电缆在早期曾用金属化纸绕包作电场屏蔽层，现在已改用半导电纸绕包。在设计电场强度很高的充油电缆中，还需用复合半导电纸绕包，即绝缘纸浆与含碳黑的纸浆在造纸过程中，将两层压合成1层纸，其一面是半导电的，另一面则是绝缘的，二者完全贴合，不存在油隙，故性能更可靠。油纸电缆的半导电层厚度见表5.1-14。

表5.1-14 油纸电缆的半导电层厚度

电缆类型		绕包部位	屏蔽层厚度 (mm)
6～10kV电缆	单芯或分相铅(铝)包电缆	绝缘层表面	0.1
	带绝缘电缆	带绝缘表面	0.1
20～35kV电缆		导体表面	0.2
		绝缘表面	0.1

1.3.2 金属屏蔽

由于挤包绝缘电缆的绝缘屏蔽层只具有半导电性，不能导通正常电流和释放故障电流，因此必须搭盖绕包铜带作为金属屏蔽。某些情况铜带截面不能满足要求时，还需要稀疏

反向缠绕铜线，使金属屏蔽总面积达到导通电流的电阻要求。单芯电缆的铜带厚度应不小于 0.12mm；多芯电缆的铜带厚度应不小于 0.10mm。金属护套也可以直接作为金属屏蔽。

1.4　缆芯的内衬层与填充物

绝缘芯成缆后（即缆芯），其外包覆的内衬层可采用挤包或绕包。除 5 芯以上电缆外，圆形绝缘线芯电缆只有在绝缘线芯间的间隙被密实填充时，才可采用绕包内衬层。挤包内衬层前允许用合适的带子稀疏缠绕扎紧。用于内衬层和填充物的材料应适合电缆的运行温度，并与电缆绝缘及其他相邻材料互相兼容。挤包内衬层的近似厚度应从表 5.1-15 中选取。当缆芯假设直径为 40mm 及以下时，绕包内衬层的近似厚度可取 0.4mm；当大于 40mm 时，可取 0.6mm。具有统包金属层的电缆，如果电缆的每个绝缘线芯均采用半导电屏蔽并统包金属层时，其内衬层应采用半导电材料，填充物也可采用半导电材料。

表 5.1-15　　挤包内衬层厚度参考表

缆芯假设直径 d（mm）	挤包内衬层厚度近似值（mm）
$d \leqslant 25$	1.0
$25 < d \leqslant 35$	1.2
$35 < d \leqslant 45$	1.4
$45 < d \leqslant 60$	1.6
$60 < d \leqslant 80$	1.8
$80 < d$	2.0

1.5　护套

金属护套、塑料护套和橡胶护套的厚度是根据护套前半制品直径的假定值来计算，但不同的护套材料，其计算公式的系数不相等，计算结果数值将有所差异。若假定值与实际值存在误差，将会影响电缆外径。实际上 IEC 标准已经将护套厚度列入产品结构表，凡是等同采用 IEC 标准的 GB/T 标准产品，均可直接套用。铅护套、平铝护套、橡塑护套和铠装外的护套厚度见表 5.1-16～表 5.1-19。

表 5.1-16　　油纸电缆的铅护套厚度（0.6/1～6/6kV）

标称截面（mm²）	铅护套标称厚度（mm）											
	0.6/1kV					1.8/3kV		3/3kV	3.6/6kV		6/6kV	
	1芯	2芯	3芯	3+1芯	4芯	1芯	3芯	1芯	1芯	3芯	1芯	3芯
25	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	—	1.2	—	—	1.3	—	1.3
35	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	—	1.2	—	—	1.4	—	1.4
50	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.4	1.2	1.5
70	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.2	1.4	1.2	1.2	1.5	1.3	1.6
95	1.2	1.4	1.4	1.5	1.5	1.2	1.5	1.3	1.3	1.6	1.3	1.7
120	1.3	1.5	1.5	1.6	1.6	1.3	1.6	1.4	1.3	1.7	1.4	1.7
150	1.3	1.6	1.7	1.7	1.8	1.3	1.7	1.4	1.4	1.8	1.4	1.8
185	1.4	1.7	1.8	1.8	1.9	1.4	1.8	1.5	1.4	1.9	1.5	1.9
240	1.4	1.8	1.9	2.0	2.1	1.4	1.9	1.5	1.5	2.1	1.5	2.1
300	1.5	1.9	2.0	2.1	2.2	1.5	2.1	1.6	1.5	2.2	1.6	2.2
400	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	1.6	2.3	1.7	1.6	2.4	1.7	2.4
500	1.7	—	—	—	—	1.7	—	—	1.7	—	1.7	—
630	1.8	—	—	—	—	1.8	—	—	1.8	—	1.8	—
800	1.9	—	—	—	—	1.9	—	—	1.9	—	1.9	—
1000	2.0	—	—	—	—	2.0	—	—	2.0	—	2.1	—

表 5.1-17　　油纸电缆的铅护套厚度（6/10～26/35kV）　　mm

标称截面	6/10kV		8.7/10kV		8.7/15kV		12/20kV		18/30kV		21/35kV		26/35kV	
	1芯	3芯	1芯	3芯	1芯	3芯分相	1芯	3芯分相	1芯	3芯分相	1芯	3芯分相	1芯	3芯分相
25	—	1.5	—	1.5	—	1.2	—	1.2	—	—	—	—	—	—
35	—	1.5	—	1.5	—	1.2	—	1.2	—	1.4	—	—	—	—
50	1.2	1.5	1.3	1.6	1.3	1.2	1.4	1.3	1.5	1.4	1.6	1.5	1.8	1.7
70	1.3	1.6	1.3	1.7	1.3	1.2	1.4	1.3	1.5	1.4	1.6	1.5	1.8	1.7
95	1.3	1.7	1.4	1.8	1.4	1.3	1.5	1.4	1.6	1.5	1.7	1.6	1.8	1.7
120	1.4	1.8	1.4	1.9	1.4	1.3	1.5	1.4	1.6	1.5	1.7	1.6	1.8	1.7
150	1.4	1.9	1.5	2.0	1.5	1.4	1.5	1.4	1.7	1.6	1.7	1.6	1.9	1.8
185	1.5	2.0	1.5	2.1	1.5	1.4	1.6	1.5	1.7	1.6	1.8	1.7	1.9	1.8
240	1.5	2.2	1.6	2.2	1.6	1.5	1.6	1.5	1.8	1.7	1.9	1.8	2.0	1.9
300	1.6	2.3	1.6	2.3	1.6	1.5	1.7	1.6	1.8	1.7	1.9	1.8	2.0	1.9
400	1.7	2.5	1.7	2.5	1.7	1.6	1.8	1.7	1.9	1.8	2.0	1.9	2.1	2.0
500	1.7	—	1.8	—	1.8	—	1.9	—	2.0	—	2.1	—	2.2	—
630	1.8	—	1.9	—	1.9	—	2.0	—	2.1	—	2.2	—	2.3	—
800	1.9	—	2.0	—	2.0	—	2.1	—	2.2	—	2.3	—	2.4	—
1000	2.1	—	2.1	—	2.1	—	2.2	—	2.3	—	2.4	—	2.5	—

表 5.1-18 铝护套和橡塑护套厚度参考值 mm

铝护套前直径	平铝护套（油纸绝缘）		橡塑护套（非铠装单芯电缆）		橡塑护套（非铠装多芯电缆）	
	标称值	最小值	标称值	最小值	标称值	最小值
12.00～20.00	1.20	1.00	1.4	标称值的85%－0.1	1.8	标称值的85%－0.1
20.01～25.00	1.30	1.10	1.6		1.8	
25.01～30.00	1.40	1.20	1.8		20	
30.01～35.00	1.50	1.30	2.0		2.2	
35.01～40.00	1.60	1.40	2.2		2.4	
40.01～45.00	1.70	1.50	2.4		2.6	
45.01～50.00	1.80	1.60	2.6		2.8	
50.01～55.00	1.90	1.70	2.8		3.0	
55.01及以上	2.00	1.80	3.0		3.0	

表 5.1-19 铠装层外护套厚度参考值 mm

护套前假设直径	包覆在金属套外	包覆在铠装层外
≤12.4	1.4	—
12.5～16.0	1.4	—
16.1～19.6	1.4	1.8
19.7～23.2	1.4	1.8
23.3～26.7	1.4	1.8
26.8～30.3	1.4	1.9
30.4～33.9	1.5	2.0
34.0～37.4	1.6	2.1
37.5～41.0	1.7	2.2
41.1～44.6	1.8	2.3
44.7～48.2	1.9	2.4
48.3～51.7	2.0	2.5
51.8～55.3	2.1	2.6
55.4～58.9	2.2	2.7
59.0～62.4	2.3	2.8
62.5～66.0	2.4	2.9
66.1～69.6	2.5	3.0
69.7～73.2	2.6	3.1
73.3～76.7	2.7	3.2
76.8～80.3	2.8	3.3
80.4～83.9	2.9	3.4
84.0～87.4	3.0	3.5
87.5～91.0	3.1	3.6
91.1～94.6	3.2	3.7
94.7～98.2	3.3	3.8
98.3～102.7	3.4	3.9

1.6 铠装

需要承受较大机械力的电缆应具有铠装层。电缆铠装层之下应有1层符合规定厚度的挤包或绕包内衬层。当铅套电缆要求铠装时，应采用包带垫层。如果在铠装层下采用隔离套，则可以由其代替内衬层或附加在内衬层上。非铅套电缆的隔离套标称厚度应不小于1.2mm，若隔离套直接挤包在铅套上，隔离套的标称厚度应不小于1.0mm。铅套涂层外的包带垫层可采用浸渍纸带，或两层浸渍纸与一层或多层复合浸渍纤维材料的组合结构，也可采用合成材料带代替浸渍纸带。垫层浸渍剂为沥青或其他防腐剂，对于金属丝铠装，浸渍剂不能直接加到金属丝上。铅套和铠装之间的包带垫层在铠装后总厚度的近似值应为1.5mm。铠装金属丝和铠装金属带应优先采用下列标称尺寸：圆金属丝直径为0.8，1.25，1.6，2.0，2.5，3.15mm；扁金属丝厚度为0.8mm；钢带厚度为0.2，0.5，0.8mm；铝或铝合金带厚度为0.5，0.8mm。电缆直径与铠装层尺寸的关系见表5.1-20和表5.1-21。

表 5.1-20 金属护套钢带铠装参数参考值

铠装前假设直径（mm）	层数	厚度（mm）	宽度（mm）
≤15.0	2	≥0.3	≤20
15.1～20.0	2	≥0.5	≤25
20.1～25.0	2	≥0.5	≤30
25.1～40.0	2	≥0.5	≤35
40.1～50.0	2	≥0.5	≤45
50.1～60.0	2	≥0.5	≤60
≥60.1	2	≥0.8	≤60

表 5.1-21 非金属护套钢带和铝带铠装参数参考值

铠装前假设直径（mm）	钢带		铝带		宽度（mm）
	层数	厚度（mm）	层数	厚度（mm）	
≤15.0	2	≥0.2	2	≥0.5	≤20
15.1～25.0	2	≥0.2	2	≥0.5	≤25
25.1～35.0	2	≥0.5	2	≥0.5	≤30
35.1～50.0	2	≥0.5	2	≥0.5	≤35
50.1～70.0	2	≥0.5	2	≥0.5	≤45
≥70.1	2	≥0.8	2	≥0.8	≤60

铠装前，若电缆假设直径＞15mm，扁金属丝的标称厚度应取0.8mm；若电缆假设直径≤15mm时，则不应采用扁金属丝铠装；铠装时，金属丝铠装应紧密，应使相邻金属丝间的间隙为最小；必要时，可在扁金属丝铠装和圆金属丝铠装外疏绕一条最小标称厚度为0.3mm的镀锌钢带。采用双金属带铠装时，还应同时采用包带垫层加强，如增加0.8mm。内衬层和附加包带垫层的总厚度不得小于规定值的80%～0.2mm。金属带铠装应螺旋绕包2层，外层金属带的中间大致在内层金属带间隙上方，包带间隙应不大于金属带宽度的50%。铠装金属带和钢丝的参数见表5.1-22和表5.1-23。

表 5.1-22 铠装金属带标称厚度 mm

铠装前假设直径 d	金属带标称厚度	
	钢带或镀锌钢带	铝或铝合金带
$d \leqslant 30$	0.2	0.5
$30 < d \leqslant 70$	0.5	0.5
$70 < d$	0.8	0.8

注 本表不适用于金属带直接包在缆芯上的电缆。

表 5.1-23 圆铠装金属丝标称直径 mm

铠装前假设直径 d	铠装金属丝标称直径
$d \leqslant 10$	0.8
$10 < d \leqslant 15$	1.25
$15 < d \leqslant 25$	1.6
$25 < d \leqslant 35$	2.0
$35 < d \leqslant 60$	2.5
$60 < d$	3.15

1.7　外护层的适用场合

具有金属套和非金属套电缆的各种铠装层的代号、名称及其适用场合见表 5.1-24 和表 5.1-25。

表 5.1-24　　适用于固定敷设方式具有金属套的电力电缆外护层

代号	名　称	被保护金属套	主要适用敷设场所										
			敷设方式									其他	
			架空	室内	隧道	电缆沟	管道	埋地		竖井	水下	腐蚀	拉力
								一般土壤	多砾石地				
02	聚氯乙烯外套	铅套 铝套	△ △	△ △	△ △	△ △	△ △	 △		 △		△ △	
03	聚乙烯外套（含阻燃）	铅套 铝套	△ △	△ △	△ △	△ △	△ △	△ △		 △		△ △	
22	钢带铠装聚氯乙烯外套	铅套 铝套		△ △	△ △	△ △		△ △	△ △			△ △	
23	钢带铠装聚乙烯外套（含阻燃）	铅套 铝套		△ △		△ △		△	△ △			△ △	
32	细圆钢丝铠装聚氯乙烯外套	各种金属套						△	△	△	△	△	△
33	细圆钢丝铠装聚乙烯外套	各种金属套								△	△	△	△
41	粗圆钢丝铠装纤维外被	铅套									△	○	△
42	粗圆钢丝铠装聚氯乙烯外套	铅套								△	△	△	△
43	粗圆钢丝铠装聚乙烯外套	铅套								△	△	△	△
441	双粗圆钢丝铠装纤维外被	铅套									△	○	△
241	钢带—粗圆钢丝铠装纤维外被	铅套									△	○	△

注　△表示适用；○表示当采用涂塑钢丝等具有良好非金属防蚀层钢丝时适用。

表 5.1-25　　适用于固定敷设方式非金属套的电力电缆外护层

代号	名　称	主要适用敷设场所									
		敷设方式								其　他	
		室内	隧道	电缆沟	管道	埋　地		竖井	水下	腐蚀	拉力
						一般土壤	多砾石地				
22	钢带铠装聚氯乙烯外套	△	△	△		△	△			△	
23	钢带铠装聚乙烯外套（含阻燃）	△		△		△	△			△	
32	细圆钢丝铠装聚氯乙烯外套					△	△	△	△	△	△
33	细圆钢丝铠装聚乙烯外套							△	△	△	△
41	粗圆钢丝铠装纤维外被								△	○	△
42	粗圆钢丝铠装聚氯乙烯外套							△	△	△	△
43	粗圆钢丝铠装聚乙烯外套							△	△	△	△
62	铝带铠装聚氯乙烯外套	△	△	△		△	△			△	
63	铝带铠装聚乙烯外套（含阻燃）	△	△	△		△	△			△	
441	双粗圆钢丝铠装纤维外被								△	○	△
241	钢带—粗圆钢丝铠装纤维外被								△	○	△

注　△表示适用；○表示当采用涂塑钢丝等具有良好非金属防蚀层钢丝时适用。

1.8　常用原材料的技术要求

1.8.1　铜单线

参考 GB 3953—1989《电工圆铜线》标准，铜单线分 TR 型软铜单线、TY 型硬铜单线和 TYT 型特硬铜单线。铜单线的电气、力学性能和物理常数见表 5.1-26。电力电缆除特殊情况外，规定采用 TR 型软铜线。

表 5.1-26　　铜单线的电气、力学性能和物理常数

型号	直径范围（mm）	20℃时密度（kg/dm³）	抗拉强度（MPa）	线膨胀系数（×10⁻⁶/℃）	20℃时电阻率（nΩ·m）	电阻温度系数（1/℃）
TR	0.02～14.0	8.89	245～289	17.0	17.241	0.003 93
TY	0.02～14.0		271～421		17.77～17.96	0.003 77
TYT	1.50～5.00		408～446		17.77～17.96	0.003 81

1.8.2 铝单线

参考 GB 3955—1983《电工圆铝线》标准可知，铝单线品种较多，包括软铝线及硬铝线，硬铝线又分为4种。标准整顿以后，架空绞线用硬铝线已归入 GB/T 17048《架空绞线用硬圆铝线》标准。LR 型软铝线、LY4 型和 LY6 型硬铝线的电气、力学性能和物理常数见表 5.1-27。

表 5.1-27 铝单线的电气、力学性能和物理常数

型号	直径范围 (mm)	20℃时密度 (kg/dm^3)	抗拉强度 (MPa)	线膨胀系数 ($\times10^{-6}$ $℃^{-1}$)	20℃时电阻率 ($n\Omega \cdot m$)	电阻温度系数 ($℃^{-1}$)
LR	0.30～10.00	2.703	最大 95	23.0	28.00	0.004 07
LY4	0.30～6.00		95～125		28.264	0.004 03
LY6	0.30～10.00		125～165		28.264	0.004 03

1.8.3 挤包塑料和橡胶材料

（1）聚氯乙烯绝缘料和护套料性能指标见表 5.1-28。

（2）可交联聚乙烯绝缘料性能指标见表 5.1-29。

（3）聚乙烯护套料性能指标见表 5.1-30。

（4）导体和绝缘的屏蔽半导电料性能指标见表 5.1-31。

表 5.1-28 聚氯乙烯电缆料性能指标

序号	绝缘混合物名称	单位	型号 J—70 (PVC/A)	JGD—70 (PVC/B)	HⅠ—90 (ST1)	HⅡ—90 (ST2)
1	未老化力学性能					
	抗张强度 ≥	N/mm^2	15.0	16.0	16.0	16.0
	断裂伸长率 ≥	%	150	150	180	180
2	空气老化后力学性能					
	烘箱温度	℃	100±2	100±2	100±2	135±2
	老化时间	h	168	168	240	240
	抗张强度 ≥	N/mm^2	15.0	16.0	16.0	16.0
	抗张强度最大变化率	%	±20	±20	±20	±20
	断裂伸长率 ≥	%	150	150	180	150
	断裂伸长率最大变化率	%	±20	±20	±20	±20
3	热老化质量损失					
	烘箱温度	℃	100±2	100±2	115±2	115±2
	老化时间	h	168	168	240	240
	质量损失 ≤	mg/cm^2	2.0	2.0	2.0	2.0
4	热变形 ≤	%	40	30	40	40
5	低温冲击脆化性能通过	℃	−15	−15	−20	−20
6	200℃热稳定性时间 ≥	min	60	100	80	180
7	介质损耗（0.1 和 1.0MHz）		—	0.1	—	—
8	体积电阻率 20℃时 ≥	$\Omega \cdot m$	1×10^{12}	1×10^{13}	1×10^{9}	1×10^{9}
	70℃时 ≥		1×10^{9}	5×10^{9}	—	—
9	介电强度 ≥	MV/m	20	25	18	18

表 5.1-29 可交联聚乙烯绝缘料性能指标

序号	试验项目	单位	技术指标 YJ—35	YJG—35	YJ—10 YJF—10	YJG—10	YJ—3 YJF—3	YJG—3
1	原始机械性能							
	抗张强度：最小中间值	MPa	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	断裂伸长率：最小中间值	%	350	350	350	350	350	350
2	空气烘箱老化后机械性能							
	老化条件：温度	℃	135±2	135±2	135±2	135±2	135±2	135±2
	时间	h	7×24	7×24	7×24	7×24	7×24	7×24
	抗张强度：最大变化率	%	±20	±20	±20	±20	±20	±20
	断裂伸长率：最大变化率	%	±20	±20	±20	±20	±20	±20
3	热延伸试验							
	试验条件：温度	℃	200±3	200±3	200±3	200±3	200±3	200±3
	负荷时间	min	15	15	15	15	15	15
	机械拉力	MPa	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	试验结果：载荷下最大伸长率	%	80	100	80	100	80	100
	冷却后最大永久变形	%	5	5	5	5	5	5

续表

序　号	试　验　项　目	单　位	技　术　指　标					
			YJ—35	YJG—35	YJ—10 YJF—10	YJG—10	YJ—3 YJF—3	YJG—3
4	凝胶含量　≥	%	80	60	80	60	80	60
5	体积电阻率（20℃）　≥	Ω·m	1×10^{14}	1×10^{14}	1×10^{14}	1×10^{14}	1×10^{14}	1×10^{14}
6	介电强度　≥	MV/m	25	25	25	25	25	25
7	介质损耗因数（50Hz20℃）　≤		0.0005	0.0005	0.001	0.001	—	—
8	介电常数（50Hz20℃）　≤		2.35	2.35	2.35	2.35	—	—
9	脆化温度（失效率≤5/30）	℃	−76	−76	−76	−76	−76	−76

注　YJ 为化学交联料；YJG 为硅烷交联料；YJF 为辐照交联料。不推荐使用 YJG—35 和 YJF—10 可交联料。
35 指可用于 35kV 电缆；10 指可用于 10kV 电缆；3 指可用于 3kV 及以下电缆。

表 5.1-30　　聚乙烯护套料性能指标

序　号	项　　目	单　位	低密度聚乙烯 （DH 和 NDH）	线性低密度聚乙烯 （LDH）	高密度聚乙烯 （GH）
1	颜色		黑色	黑色	黑色
2	熔体流动速率	g/10min	≤0.5	≤2.0	≤0.5
3	密度	g/cm^3	≤0.920～0.940	0.920～0.949	0.950～0.978
4	抗拉强度	MPa	≥13	≥14	≥20
5	断裂伸长率	%	≥500	≥600	≥650
6	介电常数（0.1 和 1.0MHz）		≤2.8	≤2.8	≤2.75
7	介质损耗（0.1 和 1.0MHz）		—	—	≤0.005
8	体积电阻率	Ω·m	$\geq1\times10^{12}$	$\geq1\times10^{12}$	$\geq1\times10^{12}$
9	介电强度	MV/m	≥25	≥25	≥25
10	氧化诱导期（铜杯）200℃	min	≥30	≥30	≥30
11	低温脆性−76℃	失效数	≤2/10	≤2/10	≤2/10
12	碳黑含量	%	2.60±0.25	2.60±0.25	2.60±0.25
13	耐环境应力	h	≥48（DH）≥96（NDH）	≥500	≥500
14	碳黑分散性　分散度	分	≥6	≥6	≥6
	碳黑分散性　吸收系数	%	≥400	≥400	≥400

表 5.1-31　　导体和绝缘的屏蔽半导电料性能指标

序　号	项　　目	单　位	热塑型半导电料	交联型半导电料	可剥离交联型半导电料
1	老化前抗张强度：最小中间值 老化前断裂伸长率：最小中间值	MPa %	15 300	15 200	10 200
2	烘箱老化后力学性能 老化条件：温度 时间 断裂伸长率：最小中间值	 ℃ h %	 100±2 240 100	 135±2 168 100	 135±2 168 100
3	热延伸试验 试验条件：温度 负荷时间 机械应力 试验结果：载荷下最大伸长率 冷却后最大永久变形	 ℃ min MPa % %	—	 200±3 15 0.20 175 15	 200±3 15 0.20 175 15
4	脆化温度	℃	−45	−50	−50
5	剥离力	N	—	—	8～40
6	体积电阻率：23℃时　≤ 90℃时　≤	Ω·cm	100 500	100 500	100 500

1.8.4 电缆纸

35kV及以下电缆和绕组线绝缘用电缆纸型号为DLZ，并分DLZ—U、DLZ—A、DLZ—B 3级，其性能指标见表5.1-32。高压电缆用电缆纸指标较高，其性能指标见表5.1-33。电缆屏蔽用单色半导电电缆纸型号为1BLZ—U和1BLZ—A，双色半导电电缆纸型号为2BLZ—U和2BLZ—A。双色纸即为半导电纸浆与绝缘纸浆复合制成的纸，其性能指标见表5.1-34。

1.8.5 电缆油和浸渍剂

自容式充油电缆用低黏度油性能指标见表5.1-35。中低压电缆油是各种浸渍剂的基础油，浸渍剂由电缆厂进行配方，制成不同用途的电缆浸渍剂，其性能指标见表5.1-36。

表5.1-32 电缆纸技术要求（35kV及以下电缆用）

项目名称		单位	性能指标								
			DLZ—U			DLZ—A			DLZ—B		
厚度		μm	80±5	130±5	170±8	80±5	130±5	170±8	80±5	130±5	170±8
紧度		g/cm³	0.85±0.05			0.85±0.07			0.85±0.10		
抗拉强度≥	纵	kN/m	5.90	10.5	13.0	5.90	10.5	13.0	4.90	9.50	11.8
	横		2.90	4.90	6.50	2.90	4.90	6.50	2.60	4.20	5.90
伸长率≥	纵	%	2.0	2.2	2.2	2.0	2.2	2.2	1.9	2.0	2.0
	横		6.0	6.5	6.5	6.0	6.5	6.5	5.7	6.0	6.0
横向撕裂度 ≥		mN	540	1080	1470	540	1080	1470	540	1080	1470
纵横平均耐折度 ≥		次	1000	2000	2000	1000	2000	2000	1000	2000	2000
交流击穿电压 ≥		V/层	600	950	1200	600	950	1200	600	950	1200
干纸 tanδ ≤		%	0.7			—			—		
电导率 ≤		mS/m	10			10			10		
水抽出液pH值			6.0～8.0			6.5～8.5			6.5～8.5		
透气度 ≤		μm (Pa·s)	0.510			0.510			0.510		
灰分 ≤		%	1.00			1.00			1.00		
交货水分		%	6.0～9.0			6.0～9.0			6.0～9.0		

表5.1-33 高压电缆用电缆纸技术要求

项目名称		单位	性能指标			
			0.45	0.75	0.125	0.175
厚度		μm	45±4.0	75±5.0	125±7.0	175±10.0
紧度		g/cm³	0.80±0.05	0.80±0.05	0.80±0.05	0.80±0.05
透气度 ≤		mL/min	10	15	20	20
抗拉强度 ≥	纵/横	kN/m	3.3/1.6	5.9/2.6	9.2/4.2	11.8/5.9
伸长率 ≥	纵/横	%	2.0/6.5	2.3/7.0	2.3/7.0	2.3/7.0
横向撕裂度 ≥		mN	20	50	125	190
水分		%	6.0～8.0	6.0～8.0	6.0～8.0	6.0～8.0
灰分 ≤		%	0.30	0.30	0.30	0.30
钠含量 ≤		mg/kg	40	40	40	40
水抽出液pH值			6.5～8.0	6.5～8.0	6.5～8.0	6.5～8.0
交流击穿电压 ≥		V/层	400	600	950	1200
水抽出液电导率 ≤		mS/m	5.0	5.0	5.0	5.0
tanδ(100℃)≤	干纸	%	0.20	0.20	0.20	0.20
	油纸	%	0.26	0.26	0.26	0.26

表5.1-34 电缆用半导电电缆纸技术要求

项目名称		单位	性能指标			
			1BLZ—U	1BLZ—A	2BLZ—U	2BLZ—A
厚度		μm	120±7	120±10	120±7	120±10
紧度		g/cm³	0.9～1.05	0.85～1.05	0.9～1.05	0.85～1.05
抗拉强度 ≥	纵/横	kN/m	7.80/3.60	7.20/3.60	8.50/3.90	7.80/3.90
伸长率 ≥	纵/横	%	2.0/6.0	2.0/6.0	2.0/6.0	2.0/6.0
横向撕裂度 ≥		mN	980	980	1180	1180

续表

项目名称	单位	性能指标			
		1BLZ—U	1BLZ—A	2BLZ—U	2BLZ—A
透气度 ≤	μm（Pa·s）	0.430	0.430	0.340	0.340
体积电阻率	Ω·cm	$1\times10^5\sim9\times10^6$	$1\times10^4\sim9\times10^6$	—	—
半导电层表面电阻率	Ω	—	—	$1\times10^5\sim1\times10^6$	$1\times10^5\sim1\times10^6$
灰分 ≤	%	1.00	1.00	1.00	1.00
碳黑洗涤稳定性		透明	透明	透明	透明
交货水分	%	5.0～8.0	5.0～8.0	5.0～8.0	5.0～8.0

表 5.1-35　自容式充油电缆用低黏度油一般性能

项目名称	单位	品种		备注
		自容式充油电缆用矿物油	自容式充油电缆用合成油	
运动黏度：20℃ 50℃	mm^2/s	8～18 3.5～5.8	6.5～8.5 3～4	
凝固点 ≤	℃	−60	−60	
闪点 ≥	℃	125	125	闭口
介质损耗正切（tanδ） 老化前：100℃ ≤ 老化后：100℃ ≤		 0.001 5 0.004	 0.001 5 0.004	老化条件为 115℃　96h
耐电强度 ≥	kV	50	60	
电场析气性 ≤	μL/min	0	−20	按 GB 11142

表 5.1-36　中低压和直流海底电缆用浸渍剂一般性能

项目名称	单位	品种			
		低压电缆油	黏性浸渍剂	不滴流浸渍剂	海底电缆浸渍剂
运动黏度：60℃ 100℃	mm^2/s	— ≥25	—	—	≥1150 —
黏度（E）：5mm 孔径 85℃ 3mm 孔径 130℃		—	6.0～7.5 —	— ≤10	—
凝固点 ≤	℃	−12	—	—	—
闪点（开口） ≥	℃	250	—	—	200
介质损耗正切（tanδ） 老化前：60℃ ≤ 100℃ ≤ 老化后：100℃ ≤		 — 0.03 0.12	 — 0.04 —	 0.04 0.3 —	 — 0.03 0.04
耐电强度 ≥	kV	35	35	35	45

注　老化条件：低压电缆油（油深 8cm）为 150℃ 48h；海底电缆浸渍剂（油深 6cm）为老化条件为 115℃ 96h。

1.8.6　电缆用铅合金

纯铅在振动情况下容易开裂，甚至在铁路运输过程中发生开裂，因此不能直接用作电缆护套，需要采用铅合金材料作护套，铅合金护套具有较好的抗开裂性能，其成分见表5.1-37。为了使铅合金成分分布均匀，用铅合金母片搀入纯熔铅内即可。铅合金母片成分见表 5.1-38。

1.8.7　铠装用镀锌钢带

铠装用镀锌钢带由热轧钢带冷轧而成，再经镀锌处理，镀锌分热镀（R 型）和电镀（D 型），且对锌层重量也有要求，在型号中用数字表示。镀锌钢带的规格见表 5.1-39。镀锌钢带锌层重量要求见表 5.1-40。另有铠装用涂漆钢带，目前使用不多。

1.8.8　铠装用镀锌钢线

不同类型电线电缆的加强或保护用钢线品种较多，而电力电缆的铠装大部分采用普通镀锌钢线，其力学性能见表 5.1-41。

表 5.1-37　电缆用铅合金的化学成分　%

铅合金种类	化学成分（质量分数）							用途
	锑	铜	碲	砷	锡	铋	铅	
铅锑	0.85	—	—	—	—	—	余量	电力电缆和通信电缆的护套
铅锡锑铜	0.4～0.6	0.02～0.06	—	—	0.2～0.4	—	余量	
铅锑铜	0.5～0.8	0.02～0.06	—	—	—	—	余量	
铅碲砷	—	—	0.04～0.10	0.12～0.20	0.10～0.18	0.06～0.14	余量	

表 5.1-38　电缆用铅合金母片种类的化学成分　%

铅合金母片种类	化学成分（质量分数）						
	铅	锑	铜	碲	砷	锡	铋
铅锑	90±1	10±1	—	—	—	—	—
铅锑铜	89±1	10±1	1±0.1	—	—	—	—
铅碲砷	95.3±1	—	—	0.7±0.1	1.6±0.1	1.4±0.1	1.0±0.1

表 5.1-39　铠装用镀锌钢带规格　mm

厚度		宽度	
标称值	允许偏差	标称值	允许偏差
0.20	±0.02	10，15，20，25	±0.50
0.30	±0.03	10，15，20，25	±0.50
0.50	±0.04	30，35	±1.00
0.80	±0.05	40，45	±1.50
1.00	±0.06	50，55，60	±2.00

表 5.1-40　铠装用镀锌钢带锌层重量要求　g/m^2

型号	三点试验平均值	三点试验最小值
R200	≥200	≥170
R275	≥275	≥230
R350	≥350	≥300
D80	≥80	≥68

表 5.1-41 普通镀锌钢线力学性能

	钢丝直径 (mm)	1%伸长时应力 ≥ (N/mm²)	抗拉强度 ≥ (N/mm²)	伸长率 ≥ (%)	缠绕试验棒直径为钢丝直径倍数	扭转次数 ≥
一级镀锌层	>1.24～2.25	1170	1340	3.0	1	18
	>2.25～2.75	1140	1310	3.0	1	16
	>2.75～3.00	1140	1310	3.5	1	16
	>3.00～3.50	1100	1290	3.5	1	14
	>3.50～4.25	1100	1290	4.0	1	12
	>4.25～4.75	1100	1290	4.0	1	12
	>4.75～5.50	1100	1290	4.0	1	12
二级镀锌层	>1.24～2.25	1100	1240	4.0	1	—
	>2.25～2.75	1070	1210	4.0	1	—
	>2.75～3.00	1070	1210	4.0	1	—
	>3.00～3.50	1000	1190	4.0	1	—
	>3.50～4.25	1000	1190	4.0	1	—
	>4.25～4.75	1000	1190	4.0	1	—
	>4.75～5.50	1000	1190	4.0	1	—

2 电力电缆的品种和技术指标

电力电缆通常以绝缘来分类，主要分为3类：①19世纪末叶至20世纪80年代最为普遍应用的黏性油浸纸绝缘铅套电缆，包括后来改进的不滴流油浸纸绝缘电缆，这类绝缘只能解决电压等级为35kV及以下的电网系统；②20世纪20年代起，迄今仍有必要采用的低黏度油纸绝缘充油电缆，主要有自容式充油电缆和钢管式充油电缆，此后也开发了由聚丙烯薄膜和木浆纤维组成的复合纸充油电缆，这类电缆主要用于110～800kV的电网系统；③挤包高分子聚合物绝缘电缆，从20世纪50年代开始研发，最初用于3kV及以下电网系统，到20世纪80年代开始盛行，并广泛用于6～35kV系统，是当前电力电缆的主流产品，此后发展到110～500kV电缆。挤包聚合物绝缘包括多种高分子材料，目前主要为聚氯乙烯、交联聚乙烯和乙丙橡胶。

电力电缆的额定电压以U_0/U（U_m）表示，其中：

U_0为电缆设计用的导体对地或金属屏蔽之间的额定工频电压；

U为电缆设计用的导体间的额定工频电压；

U_m为设备可承受的“最高系统电压”的最大值，见GB 156。

电缆额定电压应适合电缆所在系统的运行条件。为了便于选择电缆，将系统划分为A、B、C三类，其中：

A类是在一相导体与地或接地导体接触时，能在1min内与系统分离；B类是可在单相接地故障时作短时运行，根据JB/T 8996规定，接地故障时间不宜超过1h，对于该标准包括的电缆允许更长的带故障运行时间，在任何情况下不宜超过8h，每年接地故障总累计时间不宜超过125h；C类是包括不属于A类、B类的系统。在系统接地故障不能立即自动解除时，故障期间加在电缆绝缘上过高的电场梯度会在一定程度上缩短电缆寿命。若预期系统会经常地运行在持久的接地故障下，则该系统应划为C类。用于三相系统的电缆，U_0的推荐值列于表5.1-42。

表 5.1-42 额定电压U_0推荐值

系统最高电压（U_m）(kV)	额定电压（U_0）(kV)	
	A类B类	C类
1.2	0.6	0.6
3.6	1.8	3.6
7.2	3.6	6.0
12.0	6.0	8.7
17.5	8.7	12.0
24.0	12.0	18.0
36.0	18.0	—

2.1 额定电压35kV及以下挤包绝缘电力电缆

（1）一般规定。中低压挤包绝缘电力电缆（习惯称中低压挤包绝缘电力电缆）安装时的环境温度一般不低于0℃。电缆安装时的最小允许弯曲半径见表5.1-43。

表 5.1-43 电缆安装时的最小允许弯曲半径

项 目	单芯电缆		三芯电缆	
	无铠装	有铠装	无铠装	有铠装
安装时的电缆最小弯曲半径	20D	15D	15D	12D
靠近连接盒和终端的电缆的最小弯曲半径（但弯曲要小心控制，如采用成型导板）	15D	12D	12D	10D

注 D为电缆外径。

（2）电缆的品种、型号、名称和规格。参考GB/T 12706标准，包括聚氯乙烯、乙丙橡胶和交联聚乙烯绝缘3个品种。3种绝缘正常运行温度和短路温度见表5.1-44。与绝缘相配合的5种护套使用温度见表5.1-45。这3种绝缘电缆型号和产品名称见表5.1-46～表5.1-48。电缆规格见表5.1-49～表5.1-51。

表 5.1-44 各种绝缘混合料的导体最高温度

绝缘混合料	导体最高温度（℃）	
	正常运行温度	短路温度（时限5s）
聚氯乙烯PVC/A(用于1.8/3kV及以下)	70	160(截面≤300rnrn²)
聚氯乙烯PVC/B(用于3.6/6kV)	70	140(截面>300rnrn²)
交联聚乙烯XLPE	90	250
乙丙橡胶EPR和硬质乙丙橡胶HEPR	90	250

表 5.1-45 不同类型护套混合料电缆的导体最高温度

护套混合料	代号	正常运行时导体最高温度（℃）
聚氯乙烯（PVC）	ST_1	80
	ST_2	90
聚乙烯	ST_3	80
	ST_7	90
氯丁橡胶、氯磺化聚乙烯或类似聚合物	SE_1	85

表 5.1-46 交联聚乙烯绝缘电力电缆型号和产品名称

型号		产品名称
铜	铝	
YJV	YJLV	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆
YJY	YJLY	交联聚乙烯绝缘聚乙烯护套电力电缆
YJV22	YJLV22	交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆
YJV23	YJLV23	交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚乙烯护套电力电缆
YJV32	YJLV32	交联聚乙烯绝缘细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆
YJV33	YJLV33	交联聚乙烯绝缘细钢丝铠装聚乙烯护套电力电缆
YJV42	YJLV42	交联聚乙烯绝缘粗钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆
YJV43	YJLV43	交联聚乙烯绝缘粗钢丝铠装聚乙烯护套电力电缆

表 5.1-47　乙丙橡胶绝缘电力电缆型号和产品名称

型号		产品名称
铜	铝	
EV	ELV	乙丙橡胶绝缘聚氯乙烯护套电力电缆
EY	ELY	乙丙橡胶绝缘聚乙烯护套电力电缆
EV22	ELV22	乙丙橡胶绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆
EY23	ELY23	乙丙橡胶绝缘钢带铠装聚乙烯护套电力电缆
EV32	ELV32	乙丙橡胶绝缘细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆
EY33	ELY33	乙丙橡胶绝缘细钢丝铠装聚乙烯护套电力电缆

表 5.1-48　聚氯乙烯绝缘电力电缆型号和产品名称

型号		产品名称
铜	铝	
VV	VLV	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆
VY	VLY	聚氯乙烯绝缘聚乙烯护套电力电缆
VV22	VLV22	聚氯乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆
VV23	VLV23	聚氯乙烯绝缘钢带铠装聚乙烯护套电力电缆
VV32	VLV32	聚氯乙烯绝缘细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆
VV33	VLV33	聚氯乙烯绝缘细钢丝铠装聚乙烯护套电力电缆

表 5.1-49　交联聚乙烯绝缘电力电缆规格

型号		芯数	额定电压（kV）					
			0.6/1	1.8/3	3.6/6 6/6	6/10 8.7/10	8.7/15 12/20	18/30 21/35 26/35
			导体标称截面（mm^2）					
YJV	YJLV	1	1.5～800	10～800	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJY	YJLY		2.5～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV32	YJLV32		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV33	YJLV33		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV42	YJLV42		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV43	YJLV43		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV	YJLV	3	1.5～300	10～300	25～300	25～300	35～300	35～400
YJY	YJLY		2.5～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV22	YJLV22		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV23	YJLV23		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV32	YJLV32		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV33	YJLV33		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV42	YJLV42		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV43	YJLV43		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	

表 5.1-50　乙丙橡皮绝缘电力电缆规格

型号		芯数	额定电压（kV）					
			0.6/1	1.8/3	3.6/6 6/6	6/10 8.7/10	8.7/15 12/20	18/30 21/35 26/35
			导体标称截面（mm^2）					
EV	ELV	1	1.5～800	10～800	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
EY	ELY		2.5～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
EV32	ELV32		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
EY33	ELY33		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
EV	ELV	3	1.5～300	10～300	25～300	25～300	35～300	—
EY	ELY		2.5～300	10～300	25～300	25～300	35～300	—
EV22	ELV22		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	—
EY23	ELY23		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	—
EV32	ELV32		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	—
EY33	ELY33		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	—

表 5.1-51　聚氯乙烯绝缘电力电缆规格

型号		芯数	额定电压（kV）		
			0.6/1	1.8/3	3.6/6
			导体标称截面（mm^2）		
VV	VLV	1	1.5～800	10～800	25～1200
VY	VLY		2.5～1000	10～1000	25～1200
VV32	VLV32		10～1000	10～1000	25～1200
VV33	VLV33		10～1000	10～1000	25～1200
VV	VLV	3	1.5～300	10～300	25～300
VY	VLY		2.5～300	10～300	25～300
VV22	VLV22		4～300	10～300	25～300
VV23	VLV23		4～300	10～300	25～300
VV32	VLV32		4～300	10～300	25～300
VV33	VLV33		4～300	10～300	25～300

（3）电缆性能试验。

1）例行试验是由制造厂在所有制造长度电缆上进行的试验，试验项目见表 5.1-52。局部放电仅对有导体屏蔽和绝缘屏蔽的电缆进行试验。

2）抽样试验是在一批交货电缆中抽取部分样品进行必要的质量检验，样品数量见表 5.1-53，或供方和买方另行协商。抽样试验项目见表 5.1-54。

3）电气型式试验是对电缆设计的电性能考核，表 5.1-55中的试验项目 a～f，是针对具有导体屏蔽和绝缘屏蔽的电缆检验，从成品电缆中取 10～15m 长的电缆试样，所有试验应依次在同一试样上进行。3 芯电缆的每项试验应在所有绝缘线芯上进行，试验顺序按表 5.1-55 的 a～f，但规定半导电屏蔽进行电阻率测量应单独另取试样；表中序号 c

中的 tanδ 测量可以在未按正常试验顺序作过试验的另一个试样上进行；电压低于 6/10kV 的电缆则不需进行 tanδ 测量；4h 电压试验可另取新的试样进行，但该试样应预先进行过表 5.1-54 中 b 和 d 项试验；h 和 i 二项试验的试样不需要按照 a～f 顺序进行。

4）非电气型式试验项目汇总见表 5.1-56。试验具体项目和性能指标见表 5.1-57～表 5.1-62。

表 5.1-52　　例行试验项目

序　号	试验项目	试　验　要　求									
a	导体电阻	符合表 5.1-1 和表 5.1-2 或产品电阻的规定									
b	电压试验	U_0（kV）	0.6	1.8	3.6	6	8.7	12	18	21	26
		试验电压（kV）	3.5	6.5	12.5	21	30.5	42	63	73.5 或 53	91 或 65
		施压时间（min）	5	5	5	5	5	5	5	5 或 30	5 或 30
c	局部放电	电压施加于每一根导体和金属屏蔽之间，在 $1.73U_0$ 电压下局部放电量应不超过 10pC。但 IEC 60502—2005 标准已作修改，电压应升高到 $2U_0$ 维持 10s，然后降低到 $1.73U_0$，规定为 10pC 或更好的视在灵敏度下，不应检测到局部放电。目前国内尚未修改									

表 5.1-53　　按电缆交货批量长度（L）推荐的抽样试验样品数量

电缆芯数	电缆交货批量长度（L）（km）			
多芯	$2<L\leqslant10$ 抽 1 根	$10<L\leqslant20$ 抽 2 根	$20<L\leqslant30$ 抽 3 根	$L>30$ 余数类推
单芯	$4<L\leqslant20$ 抽 1 根	$20<L\leqslant40$ 抽 2 根	$40<L\leqslant60$ 抽 3 根	$L>30$ 余数类推

表 5.1-54　　抽样试验项目

序　号	项　目	试　验　要　求								
a	导体检查	目测导体结构应符合规定								
b	尺寸检查	绝缘平均厚度应不小于标称厚度，最小值应不低于标称值的 90%～0.1mm								
		光滑圆柱体上的橡塑护套，平均厚度应不小于标称厚度，最小值应不低于标称值的 85%～0.1mm								
		不光滑圆柱体上的橡塑护套，平均厚度应不小于标称厚度，最小值应不低于标称值的 85%～0.2mm								
		铅套厚度应不低于标称值的 95%～0.1mm								
		铠装圆金属丝尺寸，低于规定的标称尺寸的量值，应不超过 5% 铠装扁金属丝尺寸，低于规定的标称尺寸的量值，应不超过 8% 铠装金属带尺寸，低于规定的标称尺寸的量值，应不超过 10%								
c	电压试验（4h）	额定电压 U_0（kV）	1.8	3.6	6	8.7	12	18	21	26
		试验电压（kV）	—	—	24	35	48	72	84	104
d	热延伸试验	材料种类	EPR		HEPR		XLPE		SE_1	
		处理条件								
		空气温度（℃）	250±3		250±3		200±3		200±3	
		负荷时间（min）	15		15		15		15	
		机械应力（N/cm^2）	20		20		20		20	
		载荷下最大伸长率（%）	175		175		175		175	
		冷却后最大永久伸长率（%）	15		15		15		15	

表 5.1-55　　电 气 型 式 试 验

序号	试　验　项　目	试　验　要　求				
a	局部放电试验 （PVC 电缆无要求）	在 $1.73U_0$ 电压下测量，放电量应不大于 5pC。以后会按 IEC 修改如下：电压升到 $2U_0$ 维持 10s，再降低到 $1.73U_0$，规定为 5pC 或更好的视在灵敏度下，无局部放电				
b	弯曲及随后局放试验 D 为电缆实测外径（mm） d 为导体实测外径（mm）	弯曲试验在室温下进行，应进行正反各三次。此后进行局放试验，要求与（a）相同				
		弯曲圆柱直径倍数	铅套单芯电缆	铅套三芯电缆	其他单芯电缆	其他三芯电缆
			$25(d+D)\pm5\%$	$20(d+D)\pm5\%$	$20(d+D)\pm5\%$	$15(d+D)\pm5\%$
c	（6/10）kV 及以上电缆的 tanδ 测量	导体温度超过电缆导体正常运行最高温度 5～10℃，测量电压不低于 2kV XLPE 电缆 tanδ 不大于 80×10^{-4}；EPR 电缆 tanδ 不大于 400×10^{-4}				
d	加热循环试验及随后的局放试验	导体通电流加热到超过正常最高温度 5～10℃，加热循环应至少 8h，每一循环，在规定温度下至少维持 2h，随后冷却至少 3h。循环应 20 次。局放要求与（a）相同				

续表

序号	试验项目	试验要求							
e	冲击电压（峰值）试验及随后的工频电压试验	额定电压 U（kV）	3	6	10	15	20	30	35
		试验电压（kV）	40	60	75	95	125	170	200
		导体通电流加热到超过正常最高温度5～10℃，每个绝缘线芯经受10次正和10次负极性冲击电压后不击穿。此后在室温下经受3.5U_0工频电压试验15min不击穿							
f	4h电压试验	试验电压应为4U_0。电压应逐渐升高至规定值，绝缘应不发生击穿							
g	半导电屏蔽电阻率（包括导体和绝缘）	在绝缘芯上取下的试样进行测量，试验温度为导体最高温度±2℃，原始和经受相容试验后的测量值：导体屏蔽不超过1000Ω·m；绝缘屏蔽不超过500Ω·m							
h	绝缘体积电阻率 ρ（对无绝缘屏蔽电缆和1～3kV电缆进行）	单　位	温度（℃）	PVC/A	PVC/B	EPR	HEPR	XLPE	
		Ω·cm	20	10^{13}	10^{14}	—	—	—	
			70	10^{10}	10^{11}	—	—	—	
			90	—	—	10^{12}	10^{12}	10^{12}	
	绝缘电阻常数 k（对无绝缘屏蔽电缆和1～3kV电缆进行）	MΩ·km	20	36.7	367	—	—	—	
			70	0.037	0.37	—	—	—	
			90	—	—	400×10^{-4}	400×10^{-4}	80×10^{-4}	
i	1.8/3kV电缆电压试验	试验电压应为4U_0历时4h绝缘应不发生击穿							

表5.1-56　　绝缘混合料和护套混合料的非电气型式试验

序号	试验项目（混合料代号见4.2和4.3）	绝缘			护套				
		EPR	HEPR	XLPE	PVC		PE		SE_1
					ST_1	ST_2	ST_3	ST_7	
1	尺寸								
1.1	厚度测量	×	×	×	×	×	×	×	×
2	力学性能（抗张强度和断裂伸长率）								
2.1	老化前	×	×	×	×	×	×	×	×
2.2	空气烘箱老化后	×	×	×	×	×	×	×	×
2.3	成品电缆段老化	×	×	×	×	×	×	×	×
2.4	浸入热油后	—	—	—	—	—	—	—	×
3	热塑性能								
3.1	高温压力试验（凹痕）	—	—	—	×	×	—	×	—
3.2	低温性能	—	—	—	×	×	—	—	—
4	其他各类试验								
4.1	空气烘箱内的失重试验	—	—	—	—	×	—	—	—
4.2	热冲击试验（开裂）	—	—	—	×	×	—	—	—
4.3	抗臭氧试验	×	×	—	—	—	—	—	—
4.4	热延伸试验	×	×	×	—	—	—	—	×
4.5	不延燃试验（若需要）	—	—	—	×	×	—	—	×
4.6	吸水试验	×	×	×	—	—	—	—	—
4.7	收缩试验	—	—	×	—	—	×	×	—
4.8	碳黑含量（仅适用黑色护套）	—	—	—	—	—	×	×	—
4.9	硬度试验	—	×	—	—	—	—	—	—
4.10	弹性模量试验	—	×	—	—	—	—	—	
4.11	可剥离试验								
4.12	透水试验								

注　×表示要求试验，—表示不要求试验。

表 5.1-57 电缆绝缘混合料力学性能试验要求（老化前后）

序号	试验项目		单位	PVC/A	PVC/B	EPR		HEPR		XLPE	
						0.6/1kV 铜芯	其他电缆	0.6/1kV 铜芯	其他电缆	0.6/1kV 铜芯	其他电缆
1	老化前										
	抗张强度	最小	N/mm^2	12.5	12.5	4.2	4.2	8.5	8.5	12.5	12.5
	断裂伸长率	最小	%	150	125	200	200	200	200	200	200
2	不带铜空气烘箱老化后										
	处理温度		℃	100	100	135	135	135	135	135	135
	温度偏差		℃	±2	±2	±3	±3	±3	±3	±3	±3
	持续时间		d	7	7	7	7	7	7	7	7
	抗张强度	最小	N/mm^2	12.5	12.5	—	—	—	—	—	—
	抗张强度变化率	最大	%	±25	±25	±30	±30	±30	±30	±25	±25
	断裂伸长率	最小	%	150	125	—	—	—	—	—	—
	断裂伸长率变化率	最大	%	±25	±25	±30	±30	±30	±30	±25	±25
3	带铜空气老化后										
	处理温度		℃			150		150		150	
	温度偏差		℃	—	—	±3	—	±3	—	±3	—
	持续时间		d			7		7		7	
	抗张强度变化率	最大	%			±30		±30		±30	
	断裂伸长变化率	最大	%			±30		±30		±30	
4	带铜芯老化后弯曲试验										
	处理温度		℃	—	—	150±3	—	150±3	—	150±3	—
	持续时间		d			10		10		10	
	试验结果					不开裂		不开裂		不开裂	

表 5.1-58 护套混合料力学性能试验要求（老化前后）

序号	试验项目		单位	ST_1	ST_2	ST_3	ST_7	SE_1
1	老化前							
	抗张强度	最小	N/mm^2	12.5	12.5	10.0	12.5	10.0
	断裂伸长率	最小	%	150	150	300	300	300
2	空气烘箱老化后							
	处理条件							
	温度		℃	100±2	100±2	100±2	110±2	100±2
	持续时间		d	7	7	10	10	7
	抗张强度：							
	a）老化后数值	最小	N/mm^2	12.5	12.5	—	—	—
	b）变化率	最大	%	±25	±25	—	—	±30
	断裂伸长率：							
	a）老化后数值	最小	%	150	150	300	300	250
	b）变化率	最大	%	±25	±25	—	—	±40

表 5.1-59 聚氯乙烯绝缘混合料和护套混合料特殊性能试验要求

序号	试验项目	单位	绝缘		护套	
			PVC/A	PVC/B	ST_1	ST_2
1	空气烘箱中失重试验					
	处理温度（偏差±2℃）	℃	—	—	—	100
	持续时间	d	—	—	—	7
	最大允许失重量	mg/cm^2	—	—	—	1.5
2	高温压力试验（按 GB/T 2951）温度	℃	80±2	80±2	80±2	90±2
3	低温性能试（未经老化前进行试验）					
	直径小于 12.5mm 的冷弯曲试验 试样不应开裂	℃	−5±2	−5±2	−15±2	−15±2
	哑铃片低温拉伸试验 试样伸长率应大于 20%	℃	−5±2	−5±2	−15±2	−15±2
	冷冲击试验温度 试样不应开裂	℃	—	—	−15±2	−15±2
4	抗开裂试验					
	处理温度	℃	150±3	150±3	150±3	150±3
	持续时间	h	1	1	1	1
5	热稳定试验					
	处理温度	℃	—	200±3	—	—
	最短时间	min	—	100	—	—
6	吸水试验（电气法）					
	处理温度	℃	70±2	70±2	—	—
	持续时间	d	10	10	—	—

表 5.1-60　热塑性聚乙烯护套混合料的特殊性能试验要求

序号	试验项目	单　位	ST_3	ST_7
1	密　度	g/cm³	可协商	可协商
2	碳黑含量：标称值	%	2.5±0.5	2.5±0.5
3	收缩试验			
	温度	℃	80±2	80±2
	加热持续时间	h	5	5
	加热周期数		5	5
	最大允许收缩	%	3	3
4	高温压力试验(GB/T2951)：温度	℃	—	115±2

表 5.1-61　各种热固性绝缘混合料的特殊性能试验要求

序号	试验项目	单位	EPR	HEPR	XLPE
1	耐臭氧试验				
	臭氧浓度（按体积）	%	0.025～0.030	0.025～0.030	—
	无开裂持续试验时间	h	24	24	—
2	热延伸试验				
	处理条件	℃	250±3	250±3	200±3
	负荷时间	min	15	15	15
	机械应力	N/cm²	20	20	20
	载荷下最大伸长率	%	175	175	175
	冷却后最大永久伸长率	%	15	15	15
3	吸水试验（重量分析法）				
	处理温度	℃	85±2	85±2	85±2
	持续时间	d	14	14	14
	重量最大增量	mg/cm²	5	5	1
4	收缩试验				
	标志间长度 L	mm	—	—	200
	处理温度	℃	—	—	130±3
	持续时间	h	—	—	1
	最大允许收缩率	%	—	—	4
5	硬度测定				
	IRHD　最小		—	80	—
	弹性模量测定				
	150%伸长率下的弹性模量　最小	N/mm²	—	4.5	—

表 5.1-62　弹性体护套混合料特殊性能试验要求

序号	试验项目	单位	SE_1
1	浸油后力学性能试验		
	处理条件：油温	℃	100±2
	持续时间	h	24
	最大允许变化率：抗张强度	%	±40
	断裂伸长率	%	±40
2	热延伸		
	处理条件：温度	℃	200±3
	载荷时间	min	15
	机械应力	N/cm²	20
	负载下允许最大伸长率	%	175
	冷却后最大永久伸长率	%	15

2.2　额定电压 110kV 及以上交联聚乙烯绝缘电力电缆

当前国际上电压等级最高的交联聚乙烯绝缘电力电缆为 500kV。我国在 20 世纪末开始大量制造 64/110kV 和 127/220kV 交联电缆，目前质量水平可通过相应 IEC 标准和其他外国标准，并发布了 GB/T 11017.2—2002 和 GB/Z 18890.1～2—2002 标准。该产品一般用于城市的外围高压电网连接到市中心变电站的电缆或电站连接到高压电网。但对于特殊条件下的敷设，如海底电缆等，则需要额外保护措施及相关试验。

（1）一般规定。64/110kV（U_m = 126kV）和 127/220kV（U_m = 252kV）交联电缆的使用特性大致相似如下所示。

1）适合于运行在 JB/T 8996《高压电缆选用导则》规定的 A 类系统（主干线路）。

2）电缆正常运行时导体允许的长期最高工作温度为 90℃。

3）短路时（最长持续时间不超过 5s），电缆导体允许的最高温度为 250℃。

4）电缆安装时允许的最小弯曲半径，64/110kV 电缆为电缆直径的 25 倍，127/220kV 电缆为电缆直径的 20 倍。

（2）产品型号和名称。产品型号、名称见表 5.1-63，电缆规格及绝缘厚度见表 5.1-64，金属护套和非金属外护套厚度见表 5.1-65。

表 5.1-63　110kV 及以上交联聚乙烯绝缘电缆型号和名称

型　号	产　品　名　称	备　注
YJLW02	铜芯交联聚乙烯绝缘皱纹铝套或焊接皱纹铝套聚氯乙烯护套电力电缆	
YJLW03	铜芯交联聚乙烯绝缘皱纹铝套或焊接皱纹铝套聚乙烯护套电力电缆	
YJLW02—Z	铜芯交联聚乙烯绝缘皱纹铝套或焊接皱纹铝套聚氯乙烯护套纵向阻水电力电缆	
YJLW03—Z	铜芯交联聚乙烯绝缘皱纹铝套或焊接皱纹铝套聚乙烯护套纵向阻水电力电缆	110kV
YJQ02	铜芯交联聚乙烯绝缘铅套聚氯乙烯护套电力电缆	220kV
YJQ03	铜芯交联聚乙烯绝缘铅套聚乙烯护套电力电缆	
YJQ02—Z	铜芯交联聚乙烯绝缘铅套聚氯乙烯护套纵向阻水电力电缆	
YJQ03—Z	铜芯交联聚乙烯绝缘铅套聚乙烯护套纵向阻水电力电缆	
YJLLW02	铝芯交联聚乙烯绝缘皱纹铝套或焊接皱纹铝套聚氯乙烯护套电力电缆	
YJLLW03	铝芯交联聚乙烯绝缘皱纹铝套或焊接皱纹铝套聚乙烯护套电力电缆	
YJLLW02—Z	铝芯交联聚乙烯绝缘皱纹铝套或焊接皱纹铝套聚氯乙烯护套纵向阻水电力电缆	
YJLLW03—Z	铝芯交联聚乙烯绝缘皱纹铝套或焊接皱纹铝套聚乙烯护套纵向阻水电力电缆	110kV
YJLQ02	铝芯交联聚乙烯绝缘铅套聚氯乙烯护套电力电缆	
YJLQ03	铝芯交联聚乙烯绝缘铅套聚乙烯护套电力电缆	
YJLQ02—Z	铝芯交联聚乙烯绝缘铅套聚氯乙烯护套纵向阻水电力电缆	
YJLQ03—Z	铝芯交联聚乙烯绝缘铅套聚乙烯护套纵向阻水电力电缆	

表 5.1-64 110kV 及以上交联聚乙烯绝缘电缆规格

导体标称截面（mm²）	导体线芯结构	最少单根铜线	屏蔽厚度（mm）		绝缘标称厚度（mm）		20℃直流电阻（Ω/km）	
			导体	绝缘	110kV	220kV	铜≤	铝≤
240	圆形紧压导体	53	近似值为2/1.5含绕包层其中1.5为挤包层	近似值为1可另加绕包层	19.0	—	0.075 4	0.125
300	圆形紧压导体	53			18.5	—	0.060 1	0.100
400	圆形紧压导体	53			17.5	27	0.047 0	0.077 8
500	圆形紧压导体	53			17.5	27	0.036 6	0.060 5
630	圆形紧压导体	53			16.5	26	0.028 3	0.046 9
800	圆形紧压导体	53			16.0	25	0.022 1	0.036 7
(800)	分割导体	170			16.0	25	0.022 1	0.036 7
1000	分割导体	170			16.0	24	0.017 6	0.029 1
1200	分割导体	170			16.0	24	0.015 1	—
1600	分割导体	170			16.0	24	0.011 3	—
2000	分割导体	265			—	24	0.009 0	—
2500	分割导体	265			—	24	0.007 3	—

表 5.1-65 110kV 及以上交联聚乙烯绝缘电缆的金属护套和非金属外护套厚度

导体标称截面（mm²）	铅套厚度（mm）		铝套厚度（mm）		非金属外护套厚度（mm）	
	64/110kV	127/220kV	64/110kV	127/220kV	64/110kV	127/220kV
240	2.6	—	2.0	—	4.0	—
300	2.6	—	2.0	—	4.0	—
400	2.7	2.7	2.0	2.4	4.0	5.0
500	2.7	2.7	2.0	2.4	4.0	5.0
630	2.8	2.8	2.0	2.4	4.5	5.0
800	2.9	2.8	2.0	2.4	4.5	5.0
1000	3.0	2.8	2.3	2.6	4.5	5.0
1200	3.1	2.9	2.3	2.6	5.0	5.0
1600	3.3	3.1	2.3	2.6	5.0	5.0
2000	—	3.2	—	2.8	—	5.0
2500	—	3.4	—	2.8	—	5.0

（3）电缆的使用环境。电缆能适应的使用环境主要与外护层有关，因此64/110kV和127/220kV交联电缆适应性基本上是一致的如下所示：

1）铅套电缆可用于腐蚀较严重的场合，但无硝酸、醋酸、有机质（如泥煤）及强碱性腐蚀质，且不能承受较大的机械拉力。

2）铝套电缆可用于腐蚀不严重和要求承受一定机械力的场合，如直接与变压器连接、敷设在桥架上和竖井内等。

3）金属塑料复合护层电缆主要适用于受机械力（拉力、压力、振动等）不大，无腐蚀或腐蚀轻微的场合，且不应直接与水接触的一般潮湿场合。

4）聚氯乙烯外护套电缆主要适用于有一般防火要求和对外护套有一定绝缘要求的电缆线路。

5）聚乙烯外护套电缆主要适用于对外护套绝缘要求较高的直埋敷设的电缆线路、零下20℃的低温环境、与化学液体接触以及燃烧时要求低毒性的场合。必要时可采用无卤低烟聚烯烃护套料，若允许，则可采用含低卤的聚烯烃护套。

（4）材料和其他结构上的技术要求。

1）110kV和220kV电缆用可交联绝缘料和屏蔽料的主要性能指标见表5.1-66。

2）电缆的缓冲层、纵向阻水结构和径向不透水阻隔层要求：

①缓冲层处于绝缘半导电屏蔽层外，可采用半导电弹性材料或具有纵向阻水功能的水膨胀带绕包而成，绕包要求平整、紧实、无皱褶。

②对电缆的金属套内间隙有纵向阻水要求时，可增加纵向阻水结构，纵向阻水结构应由半导电阻水膨胀带绕包而成，半导电阻水带应绕包紧密、平整、无擦伤，如对电缆导体也有阻水要求时，导体绞合时应同时绞入阻水绳等材料。

③要求有径向不透水的阻隔层，必须采用铅套或皱纹铝套等金属套。

3）电缆外护套表面应有均匀牢固的导电层作为外护套耐电压试验时的外电极使用。

（5）主要电气性能试验要求。

1）电缆的局部放电试验指标在$1.73U_0$电压下应不超过5pC。而IEC标准最近对此指标作了修改，其含义如下：电压升高到$2U_0$维持10s，然后降低到$1.73U_0$，规定在5pC或更好的视在灵敏度下，不应检测到局部放电。

2）在室温下，导体与金属屏蔽或金属套之间应进行工频交流电压试验，试验时电压应逐渐上升至$2.5U_0$，然后保持30min，电缆绝缘不应击穿。

3）金属套和外护套表面导电层（涂敷或包覆导电层）之间，应进行直流电压25kV，历时1min的电压试验，外护套应不发生击穿。

4）雷电冲击电压试验及随后的工频电压试验：从成品电缆上取下长度大于10m的试样，导体温度控制在95～100℃。对110kV电缆以550kV电压、对220kV电缆以1050kV电压施加正负极性各10次雷电冲击电压试验而不被

击穿。经冲击电压试验后的试样再经受 $2U_0$ 历时 15min 的工频电压试验，绝缘应不发生击穿。

5）tanδ 测量：电缆导体温度控制在 95～100℃，在 U_0 电压下测量 tanδ 应不超过 8×10^{-4}。

6）有关预鉴定性试验项目，包括绝缘厚度检测、热循环电压试验、雷电冲击电压试验及其预鉴定后的电缆系统检测等，见 GB/T 11017 和 GB/Z 18890 标准。

7）成品电缆的绝缘应进行微孔和杂质检查，用最小放大倍数为 15 倍的显微镜和最小放大倍数为 40 倍的测量显微镜来检测。交联聚乙烯绝缘的微孔、杂质的尺寸和数量应符合表 5.1-67 的规定。

8）成品电缆的半导电屏蔽层与绝缘层的界面应进行微孔检查，界面的微孔尺寸和数量应符合表 5.1-67 的规定。检测工具与试验要求（7）相同。

9）成品电缆的导体半导电屏蔽层与绝缘层的界面及绝缘半导电屏蔽层与绝缘层的界面应分别进行突起检查，界面突起的尺寸和数量应符合表 5.1-67 的规定。检测工具与试验要求（7）相同。

表 5.1-66　电压为 110kV 和 220kV 电缆用绝缘料和屏蔽料性能指标

序号	项　目	单位	性能指标	
			绝缘料	半导电料
1	密度（23℃）	g/cm³	0.922±0.002	≤1.15
2	原始抗张强度：最小中间值 断裂伸长率：最小中间值	MPa %	17.0 500	12.0 150
3	热延伸试验 试验条件：温度 负荷时间 机械压力 试验结果：载荷下最大伸长率 冷却后最大永久变形	 ℃ min MPa % %	 200±3 15 0.20 100 10	 200±3 15 0.20 100 10
4	凝胶含量不小于	%	82	65
5	介质损耗因数（50Hz20℃）≤		0.000 5	—
6	介电常数（50Hz20℃）≤		2.35	—
7	介电强度 ≥	MV/m	22	—
8	体积电阻率（25℃）≥	Ω·cm	1×10^{15}	—
9	杂质最大尺寸（1000g 样片中）≤	mm	0.10	—
10	直流电阻率：23℃ < 90℃ <	Ω·cm	—	100 350

表 5.1-67　成品电缆的交联聚乙烯绝缘折算到每 10cm³ 体积的洁净度规定

序号	缺陷性质及其尺寸 S	折算到每 10cm³ 体积的允许缺陷个数	
		110kV	220kV
1	绝缘中微孔 $S>0.05$mm $0.05\geqslant S>0.025$mm	 0 ≤30	 0 ≤18
2	绝缘中不透明杂质 $S>0.125$mm $0.125\geqslant S>0.05$mm	 0 ≤10	 0 ≤6
3	绝缘中半透明深棕色杂质 $S>0.25$mm $S>0.16$mm	 0 …	 — 0
4	半导电屏蔽层与绝缘层界面微孔 $S>0.05$mm	0	0
5	导体半导电屏蔽层与绝缘层界面的突起 绝缘层进入导体屏蔽层 导体屏蔽层进入绝缘层	 $S>0.125$mm 为 0 $S>0.125$mm 为 0	 $S>0.08$mm 为 0 $S>0.08$mm 为 0
6	绝缘半导电屏蔽层与绝缘层界面的突起 绝缘层进入导体屏蔽层 $S>0.08$mm 导体屏蔽层进入绝缘层 $S>0.08$mm	 $S>0.125$mm 为 0 $S>0.125$mm 为 0	 $S>0.08$mm 为 0 $S>0.08$mm 为 0

2.3　额定电压 35kV 及以下不滴流油（包括黏性油）浸纸绝缘金属套电力电缆

20 世纪 70 年代以前，额定电压 35kV 及以下的不滴流油（包括黏性油）浸纸绝缘金属套（铅或铝）电力电缆是电网输配所用的主要品种。这种局面直至 20 世纪 80 年代中后期开始被交联聚乙烯绝缘电缆取代，现在已完全退出市场。

（1）一般规定：

1）电缆最高允许连续工作温度见表 5.1-68。

2）不滴流油浸纸绝缘电缆可用于垂直敷设的落差不受限制的场合，黏性油纸绝缘电缆的敷设有落差限制，见表 5.1-69。

3）电缆在环境温度低于 0℃敷设时，必须预先加热。

4）电缆敷设时的最小弯曲半径应不小于表 5.1-70 的规定。

（2）油浸纸绝缘电缆的型号、产品名称和规格。油浸纸绝缘电缆的型号与名称见表 5.1-71，表中代号的意义：铜导体省略；L 为铝导体或铝护套；Z 为黏性油浸纸绝缘；D 为不滴流油浸渍纸绝缘；Q 为铅护套；F 为分相；02 为裸铅包聚氯乙烯护套；03 为裸铅包聚乙烯护套；22 为钢带铠装聚氯乙烯护套；23 为钢带铠装聚乙烯护套；32 为细钢丝铠装聚氯乙烯护套；33 为细钢丝铠装聚乙烯护套；41 为粗钢丝铠装麻被护套；42 为粗钢丝铠装聚氯乙烯护层；43 为粗钢丝铠装聚乙烯护套。电缆规格见表 5.1-72。

（3）油浸纸绝缘电缆的性能指标。黏性和不滴流油浸纸绝缘电缆的性能指标有同也有异，见表 5.1-73 和表 5.1-74。

表 5.1-68　油浸纸绝缘电缆最高允许连续工作温度

电缆额定电压（kV）	导体最高允许连续工作温度（℃）	
	单芯及分相铅套	带绝缘
0.6/1	80	80
1.8/3、3.6/3	80	80
3.6/6、6/6	80	80
6/10、8.7/10	70	65
8.7/15、12/15	70	—
12/20、18/20	65	—
21/35、26/35	65	—

表 5.1-69 油浸纸绝缘电缆敷设的允许落差

电缆类型	额定电压和铠装结构		允许水平落差（m）
黏性油浸纸绝缘	1～3kV	无铠装电缆	20
		钢带和钢丝铠装电缆	25
	6～10kV 电缆		15
	20～35kV 电缆		5
不滴流油浸纸绝缘	全部电缆（从绝缘因素考虑）		无落差限制

表 5.1-70 油浸纸绝缘电缆敷设的允许弯曲半径

额定电压	铅包电缆			铝包电缆	
	单芯	多芯	分相三芯	单芯	多芯
8.7/10 及以下	$18(D+d)$	$18(D+d)$	—	$25(D+d)$	$25(D+d)$
8.7/15～12/20	$21(D+d)$	—	$15(D+d)$	$25(D+d)$	—
18/20～26/35	$25(D+d)$	—	$18(D+d)$	$30(D+d)$	—

表 5.1-71 部分纸绝缘电缆型号、名称和代号意义

型 号	名 称	备 注
ZQD02 ZLD02 ZLQD02 ZLLD02	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘铅(铝)套聚氯乙烯护套电力电缆	黏性油浸纸绝缘电缆，型号栏中删除“D”，名称栏中删除“不滴流”即可
ZQD03 ZLD03 ZLQD03 ZLLD03	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘铅(铝)套聚乙烯护套电力电缆	
ZQD22 ZLD22 ZLQD22 ZLLD22	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘铅(铝)套钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆	
ZQD23 ZLD23 ZLQD23 ZLLD23	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘铅(铝)套钢带铠装聚乙烯护套电力电缆	
ZQD32 ZLD32 ZLQD32 ZLLD32	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘铅(铝)套钢带铠装聚乙烯套电力电缆	
ZQD33 ZLD33 ZLQD33 ZLLD33	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘铅(铝)套细钢丝铠装聚乙烯套电力电缆	
ZQD41 ZLQD41	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘铅套粗钢丝铠装纤维外被电力电缆	
ZQFD22 ZLQFD22	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘分相铅套钢带铠装聚氯乙烯套电力电缆	
ZQFD23 ZLQFD23	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘分相铅套钢带铠装聚乙烯套电力电缆	
ZQFD41 ZLQFD41	铜(铝)芯不滴流油浸纸绝缘分相铅套包粗钢丝铠装纤维外被电力电缆	

表 5.1-72 油浸纸绝缘电缆规格

型 号		芯 数	额定电压 U_0/U（kV）						
			0.6/1	1.8/3 3/3	3.6/6 6/6	6/10 8.7/10	8.7/15 12/15	12/20 18/20	21/35 26/35
			标称截面范围（mm^2）						
ZLD02 ZQD02	ZLLD02 ZLQD02	1	25～1000	50～1000	50～1000	50～1000	50～1000	50～1000	50～1000
ZLD03 ZQD03 ZLD22	ZLLD03 ZLQD03 ZLLD22	2	25～400	—	—	—	—	—	—
ZQD22 ZLD23 ZQD23	ZLQD22 ZLLD23 ZLQD23	3	25～400	25～400	25～400	25～400	—	—	—
ZLD32 ZQD32 ZLD33	ZLLD32 ZLQD32 ZLLD33	3+1	25/16～400/185	—	—	—	—	—	—
ZQD33 ZQD41	ZLQD33 ZLQD41	4	25～400	—	—	—	—	—	—
ZQFD22 ZQFD23 ZQFD41	ZLQFD22 ZLQFD23 ZLQFD41	3	—	—	—	—	25～400	35～400	50～400

表 5.1-73 黏性和不滴流油浸纸绝缘成品电缆性能试验要求

序号	项 目	单 位	指 标
1	导体直流电阻（20℃）	Ω/km	见表 5.1-2
2	绝缘电阻	MΩ·km	黏性油浸纸绝缘电缆：电压为 0.6/1kV 应≥50 电压为 0.6/1kV 以上电缆应≥100 不滴流油浸纸绝缘电缆：电压为 0.6/1kV 电缆应≥100 电压为 0.6/1kV 以上电缆应≥200
3	5min 工频电压试验 6/6kV 及以下电缆 6/10kV 及以上电缆	kV	 $2.5U_0+2$kV 绝缘不击穿 $2.5U_0$ 绝缘不击穿

续表

序号	项　目	单　位	指　标			
4	介质损耗角正切及其增量①（$\tan\delta$ 及 $\Delta\tan\delta$）		黏性油浸纸绝缘电缆		不滴流油浸纸绝缘电缆	
			$U\leqslant 15kV$	$U>15kV$	$U\leqslant 15kV$	$U>15kV$
	$0.5U_0$时　$\tan\delta$		≤0.006	≤0.006	≤0.006	≤0.006
	$0.5U_0\sim 1.25U_0$　$\Delta\tan\delta_1$		≤0.001 0	≤0.000 8	≤0.005	≤0.004
	$1.25U_0\sim 2.0U_0$　$\Delta\tan\delta_2$		≤0.002 5	≤0.001 6	≤0.010 0	≤0.008 0
5	介质损耗角正切与温度关系②					
	20～60℃		0.006 0			
	70℃		0.013 0			
	75℃		0.016 0			
	80℃		0.019 0			
	85℃		0.023 0			
5	不滴流电缆 1m 长试样滴流试验					
	6/6kV 及以下电缆	%	≤3			
	6/10kV 及以上电缆		≤2.5			
6	弯曲试验及后续耐电压试验	kV	弯曲圆柱直径和弯曲后的耐电压试验值见表 5.1-74			

① 仅对 8.7/10kV 及以上单芯或分相电缆进行。

② 仅对 8.7/10kV 及以上单芯或分相黏性油浸纸绝缘电缆进行。

表 5.1-74　油浸纸绝缘电缆弯曲试验的圆柱体直径

额定电压 U_0/U（kV）	圆柱体直径					5min 工频试验电压（kV）
	铅包电缆			铝包电缆		
	单芯电缆	多芯电缆	分相多芯电缆	单芯电缆	多芯电缆	
0.6/1	$18(D+d)$	$15(D+d)$	—	$25(D+d)$	$25(D+d)$	4
1.8/3、3.6/3	$18(D+d)$	$15(D+d)$	—	$25(D+d)$	$25(D+d)$	9.5
3.6/6、6/6	$18(D+d)$	$15(D+d)$	—	$25(D+d)$	$25(D+d)$	17、27
6/10、8.7/10	$18(D+d)$	$15(D+d)$	—	$25(D+d)$	$25(D+d)$	40
12/20、18/20	$25(D+d)$	—	$18(2.15D+d)$	$30(D+d)$	—	48、72
21/35、26/3	$25(D+d)$	—	$18(2.15D+d)$	$30(D+d)$	—	85、104

2.4　额定电压 110kV 及以上自容式充油电缆

20 世纪 20 年代末，世界上发明了第一根充油电缆，很快成为高压电缆的主流，至 20 世纪 50 年代末，国际上纸绝缘充油电缆技术几乎发展到顶峰，继 500kV 电缆投入运行后，又开展了研制 750kV 电缆。由于受到木浆纤维电缆纸介质损耗正切的限制，电缆传输容量受到极大影响。为降低绝缘的介质损耗，日本大力研究聚丙烯和木纤维复合纸，虽然技术取得成功，但并未大量推广使用。我国在 20 世纪 50 年代末开始研制 110kV 充油电缆，而且很快发展到 380kV 等级，并投入应用，另外还有 110kV 海底充油电缆投入应用，性能均很稳定，总之充油电缆为我国电网建设发挥了重大作用。我国也研制完成了 500kV 自容式充油电缆，虽然投入并完成了电网线路的试运行，但未能在电网中大量应用。此外我国也研发了聚丙烯和木纤维复合纸，并用复合纸模拟性地试制成功了 110kV 充油电缆，性能满意。由于这些产品没有进一步得到国家工程项目的依托，与此同时 110kV 和 220kV 交联聚乙烯电缆的迅速发展，使充油电缆的生产和需求基本上处于停顿状态。

（1）一般规定。

1）电缆最高允许连续工作温度为 85℃。

2）电缆敷设环境温度不低于 0℃。

3）电缆内长期工作油压应大于 0.02MPa，按径向加强结构不同，允许稳态最高油压为 0.4MPa 或 0.8MPa。

4）电缆敷设时的最小弯曲半径应不小于电缆外径的 25 倍。

5）电缆敷设落差一般应不大于 30m。

（2）电缆型号、名称及敷设场合。自容式充油电缆型号、名称及敷设场合见表 5.1-75，电缆部分规格见表 5.1-13，部分参数见表 5.1-76 和表 5.1-77。

表 5.1-75　自容式充油电缆型号、名称和型号意义

型　号	名　称	敷设场合
CYZQ102 CYZQ103	铜芯纸绝缘铅包铜带径向加强聚氯乙烯护套充油电缆 铜芯纸绝缘铅包铜带径向加强聚乙烯护套充油电缆	土壤、隧道中，使用时护套能保持良好绝缘，电缆能承受较小外力，不能承受拉力
CYZQ202 CYZQ203	铜芯纸绝缘铅包不锈钢带径向加强聚氯乙烯护套充油电缆 铜芯纸绝缘铅包不锈钢带径向加强聚乙烯护套充油电缆	
CYZQ302	铜芯纸绝缘铅包铜带径向窄铜带纵向加强聚氯乙烯护套充油电缆	
CYZQ141	铜芯纸绝缘铅包铜带径向加强镀锌钢丝铠装纤维绳外护层充油电缆	水中或陆上垂直敷设，电缆能承受较大拉力
CYZQ241	铜芯纸绝缘铅包不锈钢带径向加强镀锌钢丝铠装纤维绳外护层充油电缆	

（3）成品电缆的性能试验。

1）成品电缆结构检查应符合表 5.1-76 和表 5.1-77。

2）成品电缆导体直流电阻（20℃）应符合表 5.1-76 的规定。

3）成品电缆的电容应不超过表 5.1-76 规定值 8%。

4）成品电缆介质损耗角正切（tanδ）及其增量（Δtanδ）应符合表 5.1-78 的规定。

5）成品电缆在环境温度下按表 5.1-79 规定电压进行交流电压试验而不击穿。（也可用直流电压代替交流耐压）。

6）成品电缆铅护套密封试验应在铠装前进行，在0.5～0.6MPa 压力下历时 2h，电缆应无渗油，如漏油，应允许修补，并符合试验要求。

7）成品电缆的护套耐直流电压试验，应在金属护套（或铠装层）与聚氯乙烯（或聚乙烯）上的石墨导电层之间施加直流电压 25kV，历时 1min，护套不应击穿。

8）成品电缆的电缆油样试验，应在电缆浸油结束以后 2～10 天内进行。从压力箱和油道中抽取的油样应符合以下规定：①油温为 20℃ ±10℃ 时，工频击穿电压应不低于 50kV/2.5mm；②油温为 100℃ ±1℃ 时，在 1kV/mm 电场梯度下测量其 tanδ，对 110kV 和 220kV 电缆，测量值应小于 0.005，对 330kV 电缆测量值应小于 0.003。

9）成品电缆机械性能试验按以下步骤进行：①电缆弯曲试验的圆柱体直径为 25($D+d$)，D 为铅套外径，d 为导体外径，正反方向弯曲各 3 次；②按规定进行耐电压试验，电缆不应击穿；③取中间 1m 长的样品，检查外护套和铅护套应无开裂，加强层无明显位移或损坏；④取 300mm 样品，剥除铅套，分析纸带情况，应符合标准规定。

10）成品电缆铅护套扩张试验应取 150mm 长样品，将其扩张到原来直径的 1.3 倍，应不开裂。用来进行扩张试验的锥体，其底部直径与其高度之比为 1∶3。

11）成品电缆介质损耗角正切与温度关系试验，应在 U_0 电压下测量，在环境温度不低于 25℃ 和 85℃ 的测量值、从 85℃ 冷却到 60℃、40℃ 及室温所有的测量值，均应不超过表 5.1-78 规定值。

12）成品电缆交流长时耐压试验：取经弯曲试验后的试样，在环境温度下进行，按表 5.1-79 施加电压 24h，应不击穿。

13）成品电缆雷电冲击电压试验：取经弯曲试验后的试样，将导体加热到 80℃，偏差 +5℃，按表 5.1-79 进行正、负各 10 次雷电冲击电压应不击穿。冷却到室温后，再按表进行工频电压试验应不击穿。

14）成品电缆操作冲击电压试验：取经弯曲试验后的试样，将导体加热到 80℃，偏差 +5℃，按表 5.1-79 进行正、负各 3 次操作冲击电压应不击穿。冷却到室温后，再按表 5.1-79 进行工频电压试验不应击穿。

15）铅护套和加强层液压试验：取经弯曲试验后的试样 5m，一端安装压力表，另一端用液压泵逐渐加压至 2 倍设计最高工作压力，至少 2h，铅护套应不破裂。

16）外护层沥青滴出试验：外护层含有沥青时，取 300mm 长样品，在 70℃ ±2℃ 下，历时 4h，应无沥青涂料滴出。

17）外护套耐刮磨试验：按 GB2951.28 进行刮磨试验，然后将试样浸入含 0.5%氯化钠和 0.1%的非离子型表面活性剂（均按重量计算）的水溶液中 24h，然后施加直流电压 20kV，历时 1min 不击穿。再按表 5.1-79 进行正、负各 10 次冲击电压应不击穿，此后用目力检查外护套应无开裂等表面损坏。

成品电缆性能试验项目汇总见表 5.1-80。

表 5.1-76 自容式充油电缆导体结构、直流电阻和电容

标称截面（mm²）	单线根数/单线直径（mm）	20℃导体直流电阻 ≤（Ω/km）	20℃电缆电容（μF/km）		
			110kV	220kV	330kV
240	42/2.72	0.075 4	0.332 9	—	—
300	84/2.18	0.060 1	0.355 4	0.232 1	—
400	72/2.68	0.047 0	0.383 7	0.248 3	0.206 9
500	120/2.33	0.036 6	0.410 9	0.263 8	0.219 0
630	108/2.76	0.028 3	0.442 0	0.281 4	0.232 6
(700)	108/2.90	0.025 3	0.458 5	0.290 7	0.239 9
800	155/2.59	0.022 1	0.478 8	0.302 2	0.248 7
1000	6×37/2.42	0.017 6	0.517 4	0.324 0	0.265 6
1200	6×61/2.06	0.015 1	0.542 4	0.333 2	0.272 7
1600	6×61/2.38	0.011 3	0.595 4	0.367 8	0.292 7
2000	6×61/2.68	0.009 0	0.663 6	0.406 0	0.299 3

表 5.1-77 自容式充油电缆铅套和外护套厚度 mm

铅包前直径	CYZQ102		CYZQ302		CYZQ141		所有型号	
	标称厚度	最小厚度	标称厚度	最小厚度	标称厚度	最小厚度	护套前电缆直径	外护套标称厚度
50 及以下	3.0	2.7	3.5	3.2	3.5	3.2	70 及以下	3.5
50～70.00	3.5	3.2	4.0	3.7	4.0	3.7	70～85.00	4.0
70.01 以上	4.0	3.7	4.5	4.2	4.5	4.2	85 以上	4.5

表 5.1-78 自容式充油电缆介质损角正切

额定电压（kV）	最大介质损耗角正切（tanδ）			最大介质损耗角正切增量（Δtanδ）	
	U_0	1.7U_0	2U_0	U_0 与 2U_0 之间	U_0 与 1.7U_0 之间
110	0.003 3	—	0.004 5	0.001 4	—
220	0.003 0	0.003 6	—	—	0.000 7
330	0.002 8	0.003 4	—	—	0.000 7

表 5.1-79 自容式充油电缆耐电压试验

额定电压（kV）		试验电压（kV）					
		例行试验和抽样试验		型 式 试 验			
U	U_0	交流	直流	交流	雷电冲击	操作冲击	护套冲击
110	64	138	330	160	550	—	37.5
220	127	225	545	325	1050	—	47.5
330	200	345	825	445	445	850	62.5

表 5.1-80 成品电缆性能试验项目汇总

序 号	项 目	试验类型
1	结构检查	
1.1	导体	S
1.2	绝缘及屏蔽	S
1.3	铅护套	S

续表

序　号	项　　目	试验类型
1.4	外护套	S
2	导体直流电阻试验（20℃）	R
3	电容试验	R
4	介质损耗角正切试验	R
5	交流电压试验	R
6	护套耐直流电压试验	R
7	铅护套密封试验	R
8	电缆油样试验	R
9	力学性能试验	S
10	铅护套扩张试验	S
11	介质损耗角正切与温度关系试验	T
12	交流长时耐压试验	T
13	雷电冲击电压试验	T
14	操作冲击电压试验	T
15	铅护套和加强层液压试验	T
16	外护层沥青滴出试验	T
17	外护套耐刮磨试验	T

2.5　海底电力电缆

海底电力电缆主要用于水下传输大功率电能，与地下电力电缆的作用相同，只不过应用的场合和敷设的方式不同，主要敷设于陆岛之间、岛屿之间、横越江河或港湾以及从陆上连接钻井平台或钻井平台间的互相连接等。在一般情况下，应用海底电缆传输电能往往比用小而孤立的发电站作地区性发电更经济，在近海地区应用优点更多。在岛屿和河流较多的地区应用较广泛。

海底电缆的绝缘主要有油纸绝缘和挤包绝缘（交联聚乙烯、乙丙橡胶）。浸渍纸绝缘电缆适用于不大于 45kV 交流电及不大于 400kV 直流电的线路，目前只限安装于水深 500m 以内的水域。自容式充油电缆适用于高达 750kV 的直流电或交流电线路。由于电缆为充油式，故可以毫无困难地敷设于水深达 500m 的海域。挤包绝缘电缆目前适用于 200kV 以下交流电压。由于乙丙橡胶较聚乙烯更能耐受树枝现象及局部放电，可使海底电缆更有效地发挥功能。

由于海底电缆工程被世界各国公认为复杂困难的大型工程，从环境探测、海洋物理调查，以及电缆的设计、制造和安装，都应用了复杂技术，因而海底电缆的制造厂家在世界上为数不多。

海底电力电缆的整个制造过程同一般电力电缆基本相同，但在电缆机械强度和防腐性能上有特殊严格的要求。海底电力电缆是大长度电缆，一般每根都有几十公里长。要制造一根连续无接头的电缆导体以及几十公里连续无接头的电缆必须采用软接头。软接头工艺可以将较短的电缆接续成为大长度电缆，而接头部分的外径基本上与原来的电缆本体外径相等。我国在制造大长度海底电力电缆中，已采用了这种先进的软接头工艺。

大长度海底电缆制造过程中，半成品和成品都不是绕在电缆盘上，而是盘绕在一个巨大的电缆舱里。电缆制造完毕后，将电缆从电缆舱里拖出来，经过一系列导轮引到船上并盘绕到托盘上。船开到目的地要敷设时，再从船上拖下水，船一面沿电缆线路路由行驶，一面将电缆放到海底。

为了防止电缆在海底受损，一般都要在敷设电缆时，先开出一条沟，然后把电缆放在沟里，由海水流动冲击泥沙将其掩埋起来。开挖海底电缆沟的方法，有的采用高压水枪喷射出一条沟，有的是采用电缆犁犁出一条沟来。如果路由上有海底岩石，还要采取防护措施，防止电缆磨损。

海底电缆的性能指标主要是电性能指标和机械物理性能指标。这些指标与陆地电力电缆相同。电性能指标有导体的直流电阻和交流阻抗、绝缘层的绝缘电阻、介质损耗、载流量、电缆的电容、电感、金属护层的感应电压和电流等。检验方法我国主要采用国际电工委员会推荐标准，有 IEC 60502、IEC 60840 和 IEC 60141 等，国外主要有日本 JIS，英国 BS，加拿大 CSA 以及各个制造厂的企业标准等。由于通常海底电缆的长度远远大于可以按 IEC60885—2 进行局部放电试验的电缆。因此标准的做法是在挤出长度的首端和尾部取样进行局部放电试验。

由于海底电缆的安装敷设环境恶劣，极易受到外力损伤（如海水腐蚀、船舶锚害、海流冲刷、地震等）。因此海底电缆的机械防护性能是海底电缆不同于陆缆的最重要的特性。海底电缆（包括软接头）必须按照国际大电网的推荐标准 CIGRE 21—02 进行相应的机械试验，试验项目包括：

（1）圈绕试验。适用于在制造和敷设过程中受到圈绕操作的电缆，不适于简单卷绕在电缆盘或转盘上的电缆。在圈绕操作中，电缆受到扭转。因此圈绕试验后检查电缆结构很重要。

（2）张力弯曲试验。试验的目的是考验敷设和正常修复操作时作用在电缆上的力。正常修复定义为对放置在海床上或电缆的覆盖物厚度不超过本身直径的电缆所进行的修复。如果电缆的埋设深度超过其自身的直径，而且修复后打算重新使用，则电缆在修复前必须采取适当的措施除去覆盖物。作为一种可选择方案，电缆可以从沟槽中直接捞起，但在这种情况下应当评价所需要的额外拉力，并将此拉力作为试验张力。根据水深，典型的附加张力可考虑在 5000N 至 20000N 范围。张力弯曲试验后电缆试样应进行适当的电气试验。

（3）张力试验。试验的目的仅为评价电缆和接头受到严重拉力时的基本性能提供工程信息。

（4）外部水压耐受试验。外部水压耐受试验是为了模拟电缆将要受到的最大外部水压。

（5）内部压力耐受试验。试验适用于充气和充油电缆具有正常内部工作压力的电缆。

（6）接地连接的水密性试验。如果电缆和金属套之间带有导电连接，电缆试样应包括一个这样的连接进行试验，以验证在受到最大水压时该连接不渗漏。

（7）海底试敷设试验（需要时进行）。试验仅在敷设条件和（或）电缆设计与早先确认的实践偏离很大的情况下进行。试验必须在至少与最大敷设深度相当的水深下进行。电缆回收后，应进行安装后试验规定水平的电气试验。

（8）导体透水试验和外护层透水试验。试验仅对设计具有轴向和（或）径向阻水性能的挤包绝缘电缆进行。导体透水试验模拟电缆最深处部分的电缆故障，因此施加压力时不进行热循环。电缆样品预处理条件应尽可能接近实际安装条件。外护层透水试验模拟在近岸区域的电缆损坏，其时在外部水压下外护层不再起防水作用。电缆样品的预处理条件应尽可能地接近实际安装条件。试验在包括外保护层的样品上进行。

这些试验不同于 IEC 60840 规定的试验，因为 IEC 60840 同陆地电缆有关。试验用水应是自来水或是满足设定

用途盐浓度的盐水。试验压力取决于最大敷设深度，而且试验的时间也更长。

2.6 直流电力电缆

直流电缆的结构与交流电缆相似，但其绝缘长期承受直流运行电压。直流电力电缆具有工作电场强度高、绝缘厚度薄、电缆外径小、重量轻、载流量大、损耗小、没有交变磁场等优点，适用于长距离直流输电系统，尤其是跨越海峡的大长度输电线路，可以避免交流电缆由于电容电流大而存在的临界长度限制。

在直流电缆中，金属护套和铠装上不会有感应电压，不存在护套损耗问题，直流电缆的护套结构主要考虑机械保护和防腐蚀，特别在直流海底电缆中，应采用钢丝铠装等加强防护结构，以避免外界机械力的损伤。

迄今投入运行的直流电缆的最高电压为±800kV。

2.6.1 高压直流电缆的种类

根据绝缘介质的不同，直流高压电力电缆可分为黏性浸渍型、充气型、充油型以及聚合物绝缘型电缆。

黏性浸渍型直流电缆在负荷变化条件下的最大工作场强可达 25kV/mm。因为不需要供油，尤其适用于长距离海底敷设。为了避免浸渍剂过分流动，这类电缆不适合大落差敷设运行。

充气型直流电缆的介质，常选用高密度浸渍纸充一定压力的绝缘气体组成，有较高的介电强度。

充油型直流电缆最大工作场强约为 45kV/mm，具有较优越的技术性能。

通过在挤塑绝缘中添加无机填料，消除聚合物绝缘材料中空间电荷的影响，可制成交联聚乙烯绝缘的直流高压电力电缆，图 5.1-1 为日本 250kV 交联聚乙烯绝缘直流电缆结构示意图。

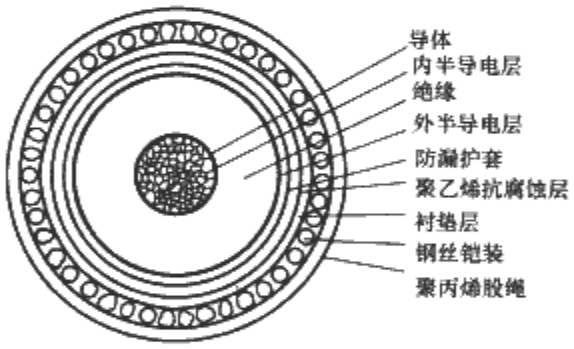


图 5.1-1 250kV 交联聚乙烯绝缘直流电缆结构示意图

2.6.2 直流电缆的电场分布特性

直流电缆的电场分布特性与交流电缆有很大的不同。

（1）交流电缆中电场应力分布是恒定的，几乎与温度无关，导体附近最高，外层屏蔽最低，取决于绝缘系统的介电系数。

（2）在直流电缆中，因绝缘电阻随温度而显著变化，故电场应力也会随之变化，电场应力分布取决于绝缘电阻和电荷分布。稳态下直流电缆的电场分布是由介质的电导率控制的。直流电缆中任一点 r 处的电场强度为：

$$E = U_0 \beta r^{\beta-1} / (R^{\beta} - r_c^{\beta}) \qquad (5.1\text{-}1)$$

式中：U_0 为电缆外加电压；β 为线芯与护套温差的函数；r 为绝缘任意一点处的半径；R 为绝缘层半径；r_c 为导体半径。

电缆空载时，相当于 $\beta=0$，直流电缆导体处应力最高，E 最大，绝缘屏蔽处绝缘层表面 E 最小。

电缆带负荷时，电缆中 E 与 β 有关：$\beta<1$ 时，E 随 r 增加而减小；$\beta=1$ 时，绝缘中 E 均匀分布，相当于平板电容器；$\beta>1$ 时，E 随 r 增加而增加，最大 E 可能出现在绝缘层表面。

因此，直流电缆绝缘设计应保证：空载时线芯表面处及最大负载时绝缘层表面处的电场强度 E 均不超过允许值。

（3）交联聚乙烯等聚合物类型的电缆，因空间电荷效应而使其局部 E 增加数倍。减少和抑制空间电荷是高压直流电缆设计的关键。

在交流电场中，复合绝缘的电场分布决定于介电常数，材料中正负电荷的迁移无法跟上工频电场的快速变化，不会产生空间电荷；在直流电场中，电场按电阻率大小分布，形成空间电荷并影响电场分布；而在聚合物绝缘中，由于有大量的局部电子陷阱存在，空间电荷效应特别严重。在绝缘材料中添加填料、极性聚合物等可减少空间电荷。交联聚乙烯电缆的绝缘内部会随着运行时间延长而积累较多的空间电荷，不利电缆使用。空间电荷使电场强度 E 提高的倍数随着加压时间延长而增加。有试验表明，长时间加压后绝缘中 E 的理论值和测量值可增至初始值的 7～9 倍。

为获得更高质量的挤包型高压直流电缆，其关键是消除绝缘材料中的空间电荷。可以通过偶极子定向极化的无机填料抑制空间电荷，或导电无机填料吸附载流子，降低空间电荷。实验表明：通过添加无机填料，空间电荷的存在只使内电极处电场强度增加 10%～40%，很好地消除了空间电荷的影响。

（4）在直流电缆运行过程中，有时为了改变电能传输方向，需要改变电缆极性。在极性变换的瞬间（几百毫秒），电缆绝缘层中的电场随时间而变化，改变极性输电时的极性叠加会使直流电缆上绝缘内部的电场分布发生变化，在绝缘中产生较高的电场梯度，极易击穿电缆。

（5）雷电和操作过电压也会叠加到直流电压上，使电场强度增大，影响直流电缆的绝缘水平。

2.6.3 直流电缆的试验

直流电缆的试验方法比交流电缆复杂得多，综合来讲，直流电缆，特别是海底电缆的型式试验大致包括下列各项目：

（1）机械试验。机械试验是在特定的设备上进行，试验时把试样两端的导体、护层、加强层和铠装层接在一起，首先进行卷绕试验，试样长度至少能卷绕 12 圈，其中包括 2 只软接头。最小卷绕直径是根据制造时或放入电缆船时的最小卷绕直径来确定的，卷绕高度不大于工厂或电缆船使用电缆时的实际高度。试验时将电缆的一端固定，防止发生转动，共卷绕 2 次；再在特定的试验设备上进行 3 次张力弯曲试验，弯曲直径不大于电缆船上的导轮直径。

机械试验后用肉眼观察，不能有加强层断裂、绝缘纸撕裂、导体与铠装的永久伸长等现象的发生，然后再进行下述电气性能试验。

（2）负荷循环及极性反转试验。在经过上述机械试验后的试样上，根据要求进行直流电缆的负荷循环及极性反转试验。试验终了，绝缘不发生击穿。

（3）冲击电压试验。在经过负荷循环及极性反转试验的试样上，按照交流电缆的试验方法进行冲击电压试验。冲击电压的数值，一般为 3 倍工作电压左右，即 $3U_0$ 左右。

（4）其他试验。除上述试验外，还有交流叠加在直流上进行的试验项目。

（5）线路重要部位的敷设深度≥150m 时，直流海底电缆还需要进行海洋现场试验。

2.7　高温超导电缆

超导电缆是利用材料在其超导临界温度下接近于电阻消失的超导状态，具有损耗极低、电流密度很高、因而能承载特大电流的特点而设计的。

早期超导材料的临界温度一般在 20K 以下，故超导电缆需要在 4.2K 的液氦中运行，因此称为低温超导电缆。现代高温超导材料的临界温度已达到 163K，用于高温超导电缆的带材超过 85K，完全可以在 77K 的液氮中运行，因此又称为高温超导电缆。

和常规电缆相比，高温超导电缆具有体积小，重量轻，损耗低和传输容量大等优点。利用高温超导电缆可以降低电力系统的损耗，提高电力系统的总效率，实现大容量输电。随着材料技术的进步，高温超导线材的成本下降迅速，使得高温超导电缆已接近实用化。

2.7.1　高温超导电缆的材料

高温超导电缆的导体是由高温超导带材绞制而成，是高温超导技术的重要应用之一。

第一代超导体的 Bi－2223 铋系带材的发展较为成熟，已经实现商业化生产。然而 Bi 系材料具有本征的缺陷，即它在液氮温区的不可逆磁场较低，临界电流密度（J_c）随外加磁场的增加迅速下降。其次在交流传输应用中交流损耗远大于基本的要求（77K 和 100mT 磁场下应小于 0.25mW/Am）。另外每公里的电缆约有 2.7 吨的银耗量，成本甚高。

第二代超导带材采用 Y 钇系带材（也被称为涂层导体），具有较高的不可逆磁场。它突破了 Bi 系材料的缺陷，使高温超导在电力工程中的广泛应用成为可能。更为可贵的是这种技术使用价廉的 Ni 或 Ni 基合金，甚至一般的不锈钢带作为衬底，材料成本明显低于第一代的 Bi－2223 系高温超导带材，成为应用前景十分诱人的第二代导体材料。

除了导体材料外还有电绝缘和热绝缘材料。

2.7.2　高温超导电缆的结构

高温超导电缆集成了超导材料、电缆、低温制冷、电力工程等多学科技术。按绝缘所处温度分类，高温超导电缆分为室温绝缘（WD）和低温绝缘（CD）两大类。

WD 高温超导电缆的结构如图 5.1-2 所示。采用皱纹不锈钢管作为液氮流通的管道，可同时起到内支撑的作用。在皱纹不锈钢管外的不锈钢网套上包绕超导带作为导体，导体的外部是以超级热绝缘为主要绝热材料的绝热管，绝热管外电缆结构包括绝缘、护套等与常导电缆基本相同。

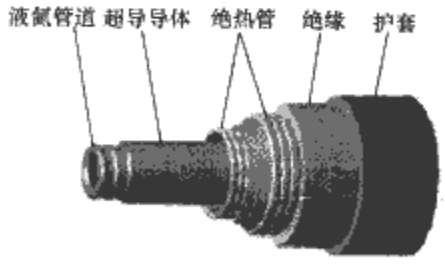


图 5.1-2　WD 高温超导电缆结构示意图

因为 WD 高温超导电缆的导体处于液氮温度，而绝缘处于室温，所以通常称为室温绝缘超导电缆，其绝缘屏蔽为一般半导电屏蔽材料构成。WD 绝缘一相电缆的导体所产生的磁场一方面会对另外两相高温超导电缆导体的超导带材料产生垂直外磁场作用，使其临界电流退化，同时磁场也会对邻相高温超导电缆的金属层产生附加的涡流损耗。WD 绝缘高温超导电缆的传输电流一般为 3000A 及以下，所以 WD 高温超导电缆一般适用于中等传输容量的输配电电缆。

与 WD 高温超导电缆不同，CD 高温超导电缆的绝缘层浸渍在液氮中。单芯 CD 高温超导电缆的结构如图 5.1-3 所示。



图 5.1-3　单芯 CD 高温超导电缆结构示意图

CD 高温超导电缆的最里层采用常规铜导体作为内支撑，其上绕包高温超导带材作为导体。高温超导带材的外侧包复绝缘，包括导体屏蔽、绝缘、绝缘屏蔽和高温超导带屏蔽层。最外侧是绝热套和电缆护套。液氮在绝热套内流动，超导导体、绝缘及超导绝缘屏蔽等部件完全浸泡在液氮之中。

CD 绝缘高温超导电缆的绝缘屏蔽采用和导体相同的高温超导带材绞制形成，CD 高温超导电缆运行时，处于超导状态的高温超导带屏蔽层将感应出电流，感应电流与超导电缆导体内的电流大小相近，电流方向相反，总磁场几乎为零，基本不存在高温超导电缆导体因垂直于超导带材料的外磁场造成临界电流退化的问题。同时，由于 CD 高温超导电缆不对邻相高温超导电缆产生磁场影响，使其金属层感应交流损耗。但由于增加屏蔽用的高温超导体，高温超导材料用量增加一倍以上。由于 CD 高温超导电缆的绝缘浸入液氮中运行，必须采用与液氮相容性良好的塑料薄膜与纤维纸复合电气绝缘材料作为 CD 高温超导电缆绝缘。

CD 高温超导电缆可以采用单芯结构，亦可以采用三芯电缆结构，图 5.1-4 为三芯 CD 高温超导电缆结构示意图。

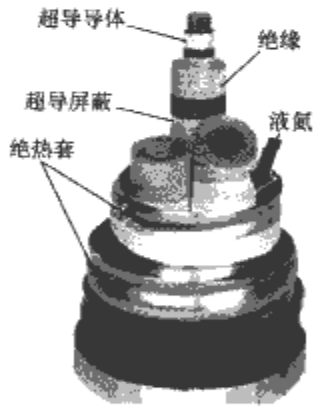


图 5.1-4　三芯 CD 高温超导电缆结构示意图

2.7.3　高温超导电缆的特点及应用

高温超导电缆适用于大容量高负荷密度的输电，一般认为 CD 绝缘高温超导电缆导体电流可以达到 10kA 或以上。与常规电缆相比较，CD 高温超导电缆在相同传输容量条件下，具有电缆尺寸较小和传输电流大、输电容量大的优势，可以取代常规电缆，如充油电缆、交联聚乙烯（XLPE）绝缘电缆，用于城市地下输电网，解决城市地下电缆走廊拥挤无法敷设电缆线路的困难；或者利用现有地下电缆排管设施，用高温超导电缆取代现有常规电缆增加传输容量。这类高温超导电缆额定电压为 35～110kV，传输电流至 2kA 或以上，传输容量至 400MVA 左右。高温超导电缆另一重要应用场合是采用高温超导电缆将特大传输容量（容量可达 1000MVA 以上）电力传输进入城市负荷中心。如果采用常规电缆将 1000MVA 以上负荷传输进入城市负荷中心，必须采

用额定电压500kV电缆，如500kV XLPE电缆，并在中心城区或靠近区域建设500kV变电站，但变电站选址十分困难；若采用大长度500kV XLPE电缆系统，所必需的高可靠性的500kV XLPE连接接头目前仅有日本可以提供产品，国内无法近期开发。采用特大传输容量的高温超导电缆，额定电压只需110kV，就可传输容量1000MW，CD绝缘的高温超导电缆将是常规500kV电缆最有竞争力的替代方案。

3 电力电缆附件

电力电缆附件总的系列分终端和接头两大部分。终端系列分户内终端、户外终端和设计型终端3类。接头分直通接头、分支接头、堵油接头、转换接头和过渡接头5类。从终端和接头的结构和工艺来看，分瓷套式、浇注式、套管式、绕包式、热收缩式、冷收缩式、预制件装配式、预制件插入式、树脂浇铸式、固定式、模塑式和塞止盒式。品种虽多，但不少已被淘汰。

3.1 电力电缆附件常用的绝缘材料和半导电材料及其部件

电力电缆附件常用的绝缘材料有：硅油（表5.1-81）；沥青基浇注剂（表5.1-82）；松香石油基流体绝缘剂（表5.1-83）；冷浇铸环氧树脂（表5.1-84）；冷浇铸聚氨酯树脂（表5.1-85）；自黏性橡胶绝缘带（表5.1-86）；预制件用绝缘橡胶（表5.1-87）；自黏性橡胶半导电带（表5.1-88）；预制件用半导电橡胶（表5.1-89）；热熔胶（表5.1-90）；填充胶（表5.1-91）；热收缩绝缘管和热收缩耐油管（表5.1-92）；热收缩半导电管和热收缩应力管（表5.1-93）；硅脂润滑剂（表5.1-94）；热收缩耐漏电痕管、雨罩、分支管和护套管（表5.1-95）等。这些材料或部件的主要性能指标可参见括号内注明的表格。

表5.1-81 硅油性能指标

试 验 项 目		单 位	性能要求	试验方法
密度		g/cm^3	0.97	GB/T 1884
闪点	≥	℃	300	GB/T 267
凝固点	≥	℃	−45	GB/T 510
挥发度/质量比	≤	%	2.0	GB/T 7325
黏度（23℃）		mm^2/s	10 000～12 500	GB/T 265
介电常数			2.6～2.8	GB/T 5654
体积电阻率	≥	Ω·m	1×10^{12}	GB/T 5654
介质损耗角正切	≤		0.001	GB/T 5654
击穿场强（20℃）	≥	kV/mm	14	GB/T 507

表5.1-82 沥青基浇注剂性能指标

试 验 项 目		单 位	性 能 要 求					试验方法
			1号	2号	3号	4号	5号	
软化点（环球法）	≥	℃	44～55	55～65	65～75	75～85	85～95	GB/T 4507
溶解度（苯）	≥	%	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	GB/T 11148
闪点（开口）	≥	℃	200	230	230	230	230	GB/T 267
击穿电压（60℃）								GB/T 507
2.5mm间隙1min	≥	kV	40	40	45	50	60	
浇注温度		℃	120～140	150～160	160～170	170～180	180～190	SY 1664
脆点	≤	℃	−45	−35	−30	−25	−25	GB/T 4510
收缩率（150～20℃）	≤	%	8	8	8	8	8	SY 2811
灰分	≤	%	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	GB/T 508
黏附率	≥	%	90	90	90	90	90	SY 1664
游离硫			无	无	无	无	无	GB/T 388
蒸发损失	≤	%	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	GB/T 11964
吸水率（2mm6.5mm^2）	≤	%	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	SY 1664
水容性酸或碱			中性	中性	中性	中性	中性	GB/T 259

表5.1-83 松香石油基流体绝缘剂性能指标

试 验 项 目		单 位	性能要求	试验方法
运动黏度100℃		mm^2/s	69～79	GB/T 265
50℃			1400～1600	
密度（25℃）		g/cm^3	0.89～0.95	GB/T 1884
闪点（开口）	≥	℃	200	GB/T 267
燃点	≥	℃	250	GB/T 267
浇注温度		℃	80～85	
酸值	≤	mg·KOH/g	0.1	GB/T 264
游离硫			无	GB/T 380
灰分	≤	%	0.1	GB/T 508
击穿场强20℃	≥	kV/mm	14	GB/T 507
80℃	≥	kV/mm	10	
介质损耗角正切 20℃	≤		0.03	GB/T 5654
60℃	≤		0.05	
介电常数			2.4～2.8	GB/T 5654
体积电阻率	≥	Ω	5×10^{10}	GB/T 5654

表5.1-84 冷浇铸环氧树脂性能指标

试 验 项 目		单 位	性能要求	试验方法
闪点（开口）不参加反应的材料	≥	℃	100	GB/T 267
参加反应的材料	≥	℃	50	
浇注时限（10～30℃时）	≥	min	20	JB 7831
最高反应温度	≤	℃	160	JB 7831
耐冲击强度	≥	Nmm/mm^2	6	JB 2571
抗压强度	≥	N/mm^2	100	GB/T 2569
吸水性				GB/T 1034
23℃ 24h	≤	%	0.5	
50℃ 42d	≤	%	4	
热膨胀系数（20～50℃）		K^{-1}	1×10^{-4}	GB/T 1036
击穿场强（23℃）	≥	kV/mm	20	GB/T 1408
介电常数			6	GB/T 1409
体积电阻率				GB/T 1410
23℃	≥	Ω·m	1×10^{12}	
23℃浸水24h后	≥	Ω·m	1×10^{11}	
抗漏电痕迹（户外型）			1A3.5	GB/T 6553
耐油性（浸黏性油168h）	≤	%	5	JB 7831

表 5.1-85　冷浇铸聚氨酯树脂性能指标

试验项目		单位	性能要求	试验方法
闪点（开口）				GB/T 267
不参加反应的材料	≥	℃	100	
参加反应的材料	≥	℃	55	
浇注时限（10～30℃时）	≥	min	20	JB 7831
最高反应温度	≤	℃	120	JB 7831
物理结构			断面均匀、无气泡	JB 7831
耐冲击强度	≥	N/mm²	10	JB 2571
压缩试验	≥			GB/T 1041
镦粗 30%的压缩应力	≥		20	
卸去负荷 24h 后残余变形	≤		10	
硬度	≥	邵氏	30	GB/T 2411
抗压强度	≥	N/mm²	5	GB/T 2568
断裂伸长率	≥	%	10	GB/T 2568
热导率	≥	W/(m·K)	0.1	GB/T 3399
氧指数（有要求时）	≥		30	GB/T 2406
吸水性				GB/T 1034
23℃ 24h	≤	%	0.50	
50℃ 42d	≤	%	4	
热膨胀系数（20～50℃）		K^{-1}	1×10^{-4}	GB/T 1036
击穿场强（23℃）	≥	kV/mm	20	GB/T 1408
介电常数			6	GB/T 1409
体积电阻率				GB/T 1410
23℃	≥	Ω·m	1×10^{12}	
23℃浸水 24h 后	≥	Ω·m	1×10^{11}	
抗漏电痕迹（户外型）			1A3.5	GB/T 6553
耐油性（浸黏性油 168h）	≤	%	1A3.5	JB 7831

表 5.1-86　自黏性橡胶绝缘带性能指标

试验项目		单位	性能要求		试验方法
			Ⅱ型（70℃级）	Ⅲ型（90℃级）	
抗张强度	≥	MPa	1.0	1.7	GB/T 528
伸长率	≥	%	500	500	GB/T 528
击穿场强	≥	kV/mm	20	28	GB/T 1695
体积电阻率	≥	Ω·m	1×10^{12}	1×10^{12}	GB/T 1692
介质损耗角正切	≤		0.05	0.05	GB/T 1693
介电常数	≤		5.0	5.0	GB/T 1693
自黏性			无松脱	无松脱	略
耐热应力开裂			不开裂	不开裂	略
耐热性		℃	100	130	略

表 5.1-87　预制件用绝缘橡胶性能指标

试验项目		单位	性能要求		试验方法
			乙丙橡胶	硅橡胶	
抗张强度	≥	MPa	4.2	4.0	GB/T 528
伸长率	≥	%	300	300	GB/T 528
硬度	≤	邵氏 A	65	50	GB/T 531
抗撕强度	≥	N/mm	10	10	GB/T 529
击穿场强	≥	kV/mm	25	20	GB/T 1695
体积电阻率	≥	Ω·m	1×10^{13}	1×10^{12}	GB/T 1692
介质损耗角正切	≤		0.02	0.02	GB/T 1693
介电常数	≤		2.6～3.0	2.8～3.5	GB/T 1693
抗漏电痕迹			1A3.5	1A3.5	GB/T 6553

表 5.1-88　自黏性橡胶半导电带性能指标

试验项目		单位	性能要求	试验方法
抗张强度	≥	MPa	1.3	GB/T 528
伸长率	≥	%	500	GB/T 528
体积电阻率	≤	Ω·m	1×10^{2}	GB/T 3048
自黏性			无松脱	略
耐热应力开裂			不开裂	略
耐热性		℃	130	略

表 5.1-89　预制件用半导电橡胶性能指标

试验项目		单位	性能要求		试验方法
			乙丙橡胶	硅橡胶	
抗张强度	≥	MPa	10.0	4.0	GB/T 528
伸长率	≥	%	350	350	GB/T 528
硬度	≤	邵氏 A	70	55	GB/T 531
抗撕强度	≥	N/mm	30	13	GB/T 529
体积电阻率	≤	Ω·m	1.5	1.5	GB/T 2439

表 5.1-90　热熔胶性能指标

试验项目		单位	性能要求	试验方法
针入度（25℃ 100g）		1/10mm	6～19	GB/T 4509
软化点（环球法）	≥	℃	80	GB/T 4507
体积电阻率	≥	Ω·m	1×10^{10}	GB/T 1410
击穿场强	≥	kV/mm	10	GB/T 1408
剥离强度				GB/T 2709
热收缩材料对非金属材料	≥	kN/m	5.0	
热收缩材料对金属材料	≥	kN/m	7.5	

表 5.1-91　填充胶性能指标

试验项目		单位	性能要求			试验方法
			普通胶	耐油胶	应力驱散胶	
针入度(25℃ 100g)		1/10mm	40～50	60～65	40～50	GB/T 4509
体积电阻率	≥	Ω·m	1×10^{10}	1×10^{12}	1×10^{8}	GB/T 1410
击穿场强	≥	kV/mm	12	12	—	GB/T 1408
介电常数	≤		—	—	15	GB/T 1409
浸油质量变化率（80℃黏性油 168h）		%	—	±5	—	JB 7829

表 5.1-92　热收缩绝缘管和热收缩耐油管性能指标

试验项目		单位	性能要求		试验方法
			绝缘管	耐油管	
抗张强度	≥	MPa	10	10	GB/T 1040
断裂伸长率	≥	%	350	350	GB/T 1040
脆化温度	≤	℃	−40	—	GB/T 5470
硬度	≤	邵氏 A	80	80	GB/T 2411
空气烘箱热老化（130℃168h）					GB/T 7141
抗张强度变化率	≤	%	±20	±20	
断裂伸长率变化率	≤	%	±20	±20	
体积电阻率	≥	Ω·m	1×10^{12}	1×10^{12}	GB/T 1410
介电常数	≤		4	4	GB/T 1409
击穿场强	≥	kV/mm	20	20	GB/T 1408

续表

试验项目		单位	性能要求		试验方法
			绝缘管	耐油管	
热冲击（160℃4h）			不龟裂、不流淌	不龟裂、不流淌	JB 7829
氧指数			30	—	GB/T 2406
耐油性（80℃黏性油 168h）					GB/T 2951
抗张强度变化率	≤	%	—	±20	
断裂伸长率变化率	≤	%	—	±20	
限制性收缩后外观			不龟裂	不龟裂	GB/T 7829
工频耐压（1min）	≥	kV	2	2	GB/T 7829

表 5.1-93 热收缩半导电管和热收缩应力管性能指标

试验项目		单位	性能要求		试验方法
			绝缘管	耐油管	
抗张强度	≥	MPa	10	10	GB/T 1040
断裂伸长率	≥	%	350	350	GB/T 1040
脆化温度	≤	℃	−40	—	GB/T 5470
硬度	≤	邵氏 A	80	80	GB/T 2411
空气烘箱热老化（130℃168h）					GB/T 7141
抗张强度变化率	≤	%	±20	±20	
断裂伸长率变化率	≤	%	±20	±20	
体积电阻率	≥	Ω·m	1～10	10^4～10^6	GB/T 1410
介电常数	≤		—	20	GB/T 1409
热冲击（160℃4h）			不龟裂、不流淌	不龟裂、不流淌	JB 7829
限制性收缩后外观			不龟裂	不龟裂	JB 7829

表 5.1-94 硅脂润滑剂性能指标

试验项目		单位	性能要求	试验方法
针入度（25℃100g）		1/10mm	200～300	GB/T 269
挥发物（喷霜）200℃24h	≤	%	2	GB/T 7325
击穿场强	≥	kV/mm	8	GB/T 507
介电常数	≤		2.8～3.2	GB/T 5654
介质损耗角正切	≤		0.005	GB/T 5654
体积电阻率	≥	Ω·m	1×10^{11}	GB/T 5654

表 5.1-95 热收缩耐漏电痕管、雨罩、分支管和护套管性能指标

试验项目		单位	性能要求		试验方法
			耐漏电痕管、雨罩	分支管、护套管	
抗张强度	≥	MPa	8	12	GB/T 1040
断裂伸长率	≥	%	300	300	GB/T 1040
脆化温度	≤	℃	−40	−40	GB/T 5470
硬度	≤	邵氏 A	80	80	GB/T 2411
空气烘箱热老化（130℃168h）					GB/T 7141
抗张强度变化率	≤	%	±30	—	
断裂伸长率变化率	≤	%	±30	—	
体积电阻率	≥	Ω·m	1×10^{12}	1×10^{11}	GB/T 1410
介电常数	≤		5	—	GB/T 1409
击穿场强	≥	kV/mm	20	15	GB/T 1408
耐漏电痕迹	≥		1A3.5		GB/T 6533
热冲击（160℃4h）			不龟裂、不流淌	不龟裂、不流淌	JB 7829
吸水率（23℃24h）	≤	%	0.1	0.1	GB/T 1034
限制性收缩后外观			不龟裂	不龟裂	JB 7829
工频耐压（1min）		kV	2	2	
耐大气和光老化 42 天老化后					GB/T 14049
抗张强度变化率	≤	%	±30	±30	
断裂伸长率变化率	≤	%	±30	±30	

续表

试验项目		单位	性能要求		试验方法
			耐漏电痕管、雨罩	分支管、护套管	
21 天老化后与 42 天老化后对比					
抗张强度变化率	≤		±30	±30	
断裂伸长率变化率	≤		±30	±30	

3.2 额定电压 35kV 及以下黏性油（含不滴流油）浸纸绝缘电缆的附件

额定电压 35kV 及以下黏性油（含不滴流油）浸纸绝缘电缆附件品种及型号见表 5.1-96。部分品种示意图见图 5.1-5和图 5.1-6。

表 5.1-96 电压 35kV 及以下油纸绝缘电缆附件品种、型号和结构

电压等级（kV）	附件名称		结构说明	型号
10kV 及以下多芯电缆	户外终端头	鼎足式铸铁终端头	铸铁盒体，盒盖加瓷套，内灌沥青	WCY
		鼎足式铝合金终端头	铝合金盒体和盖一体化加瓷套，内灌沥青	WCYL
		鼎足式瓷质终端头	盒体盒盖瓷套用瓷材制成一体，内灌沥青	WCYC
		鼎足式环氧树脂终端	总体由环氧树脂工厂预制，现场浇注环氧树脂	WHZ
		扇形铸铁终端头	三个瓷套排在一个平面上，内灌沥青	WCS
		倒挂式铸铁终端头	三个瓷套向下，内灌沥青	WCG
		热收缩式终端头	用热收缩管及分支套雨罩，现场套装加热收缩	WRSZ
	户内终端头	尼龙盒终端头	尼龙盒，内灌沥青或电缆油	NS
		环氧树脂终端头	用塑料盒现场浇注环氧树脂	NHZ
		热收缩式终端头	用热收缩管及分支套，现场套装加热收缩	NRSZ
	直通连接头	铅套管式连接头	铅套管现场与电缆铅套封焊，内灌沥青或电缆油	JQ
		铸铁盒整体连接头	铸铁盒整体未保护壳，内灌沥青或电缆油	JZ
		环氧树脂连接头	在电缆接头盒或模具内现场浇注环氧树脂	JHZ
		热收缩式连接头	用热收缩管，现场套装加热收缩	JRSZ
35kV（户内外）单芯电缆	终端头	瓷套管式终端头	由铜和铝合金尾管加瓷套管构成	WCT—1—51 WCT—2—51
	直通连接头	铅套管式连接头	铅套管现场与电缆铅套封焊，内灌电缆油	JQ

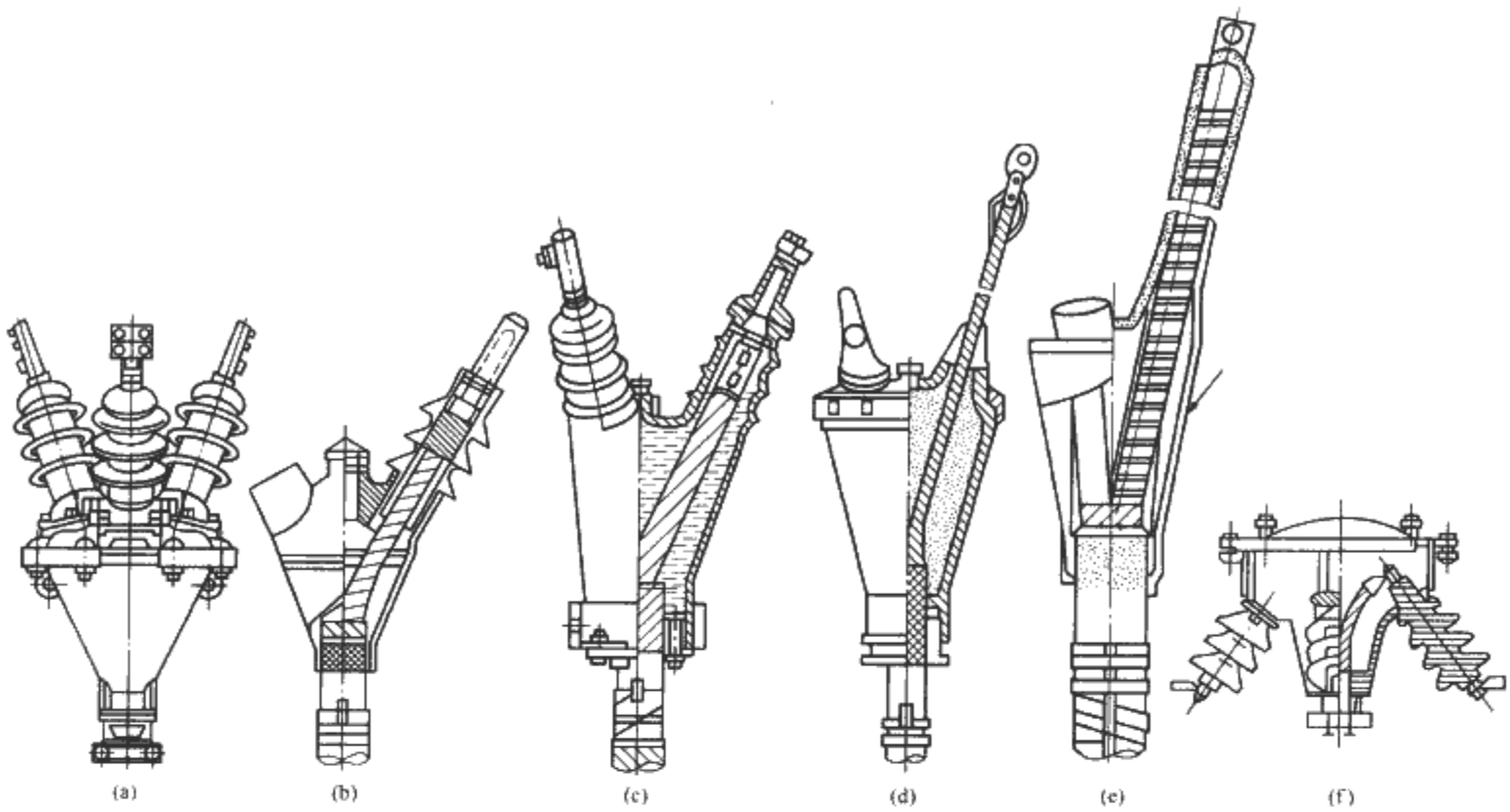


图 5.1-5　10kV 及以下油纸电缆终端示意图
(a) WCY 型；(b) WHZ 型；(c) WCYC 型；(d) NS 型；(e) NHZ 型；(f) WCG 型

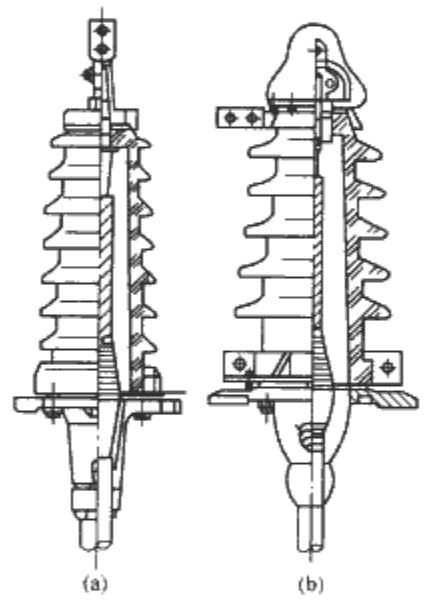


图 5.1-6　35kV 油纸电缆瓷套式终端
(a) WCT—1—51 型；(b) 558 型

3.3　额定电压 35kV 及以下挤包绝缘电缆附件

中低压挤包绝缘电缆附件是指额定电压范围为 1～35kV，不包括 46/66kV 等级的电缆终端头和连接头，目前基本品种有：

(1) 绕包式电缆附件，其绝缘和屏蔽均用带材（通常用自粘带）绕包制成。

(2) 热收缩式电缆附件，采用各种热收缩管及分支套雨罩等，现场套装加热收缩成型。

(3) 冷收缩式缆附件，采用弹性体制成部件，如硅橡胶或乙丙橡胶等，该部件预先用金属件支撑扩张，在现场装配后取下支撑物，自行收缩成型。

(4) 浇铸式电缆附件，采用环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸酯等聚合物，用模具或盒子现场浇注，固化后成型，一般模具可拆卸后再使用，盒子可不拆卸而作保护壳。

(5) 模塑式电缆附件，通常采用与电缆绝缘同类带材绕包，如辐照交联聚乙烯带材，再包一层高熔点隔离带，如聚四氟乙烯带，然后用模具热压，使交联聚乙烯带粘合成型，外面还有保护壳。

(6) 预制式电缆附件，由工厂预制各部件，在现场装配和处理制成。

由于电缆产品不断发展，电缆附件也不断出现新的安装技术和新的结构型式。35kV 及以下挤包绝缘电缆附件品种、型号见表 5.1-97。附件的特点、试验参数和用途见表 5.1-98。部分产品结构见图 5.1-7～图 5.1-11。

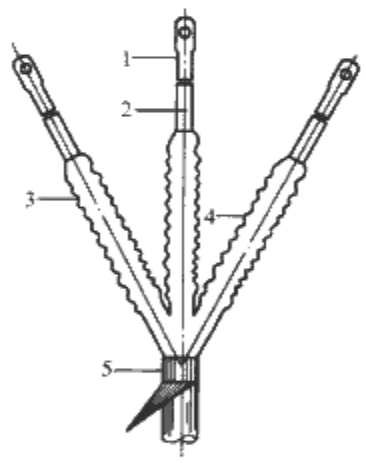


图 5.1-7　JFN 型交联电缆 FSD 型户内终端
1—接线端子；2—电缆绝缘；3—绝缘自粘带；4—FSD 片；5—捆扎线

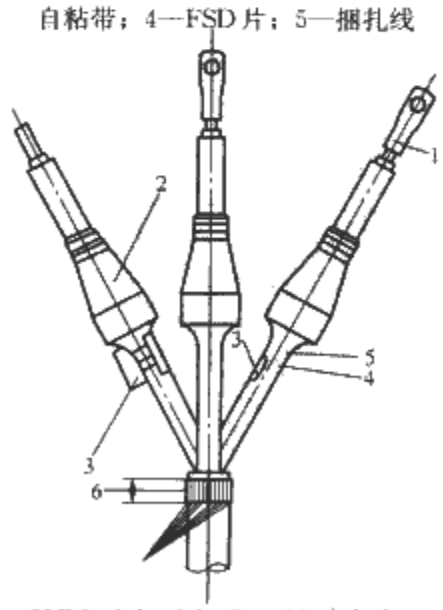


图 5.1-8　JYN 型交联电缆预制型户内终端示意图
1—接线端子；2—应力锥；3—半导电片；4—绝缘自粘带；5—电工带；6—扎线

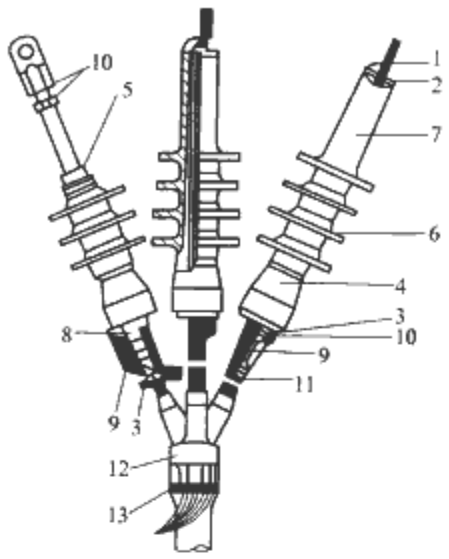


图 5.1-9 JYW 型交联电缆预制型户外终端示意图

1—接线端子；2—软管夹；3—集流环；4—应力锥；5—绝缘连接管；6—雨裙；7—顶帽；8—应力锥；9—半导电片；10—绝缘自粘带；11—电工带；12—三叉手套；13—扎线

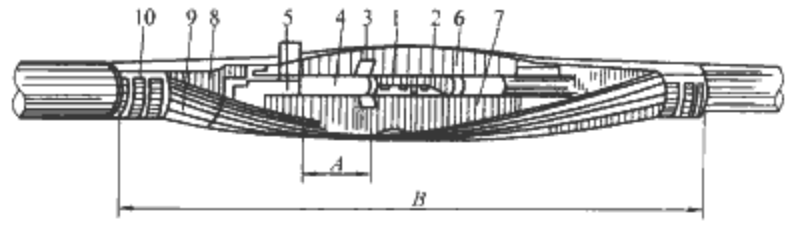


图 5.1-10 JFJ 交联聚乙烯电缆 FSD 型连接头示意图

1—线芯连接管；2—半导电带；3—FSD 片；4—电缆绝缘；5—绝缘屏蔽；6—绝缘自粘带；7—电工带；8—铜网；9—金属屏蔽；10—保护带

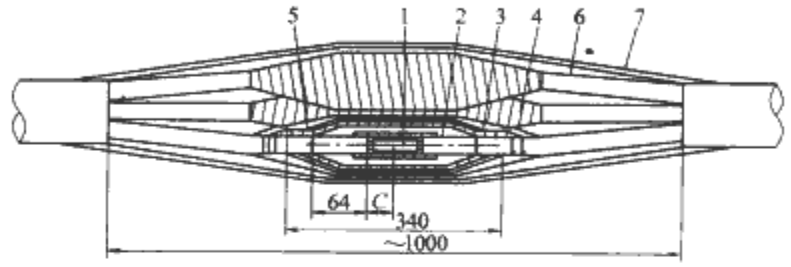


图 5.1-11 JYJ10～35kV 预制式连接头示意图

1—导体连接；2—预制橡胶件；3—金属屏蔽连接；4—铜网捆扎；5—保护层；6—填充层；7—外护层

表 5.1-97 电压 35kV 及以下挤包绝缘电缆附件品种、型号、适用电缆规格

型 号	产品名称	额定电压（kV）	参照标准	适用导体截面规格（mm²）
JFN JFLN	FSD 型户内终端	6/10、8.7/10	IEC 60502 GB 11033	1×25～1×1000 3×25～3×300
IYN JYLN	预制式户内终端	6/10、8.7/15 12/20、26/35	IEC 60502 GB 11033	1×25～1×800 3×25～3×300 1×25～1×630 3×25～3×300 1×50～1×400 3×50～3×300
JYW JYLW	预制式户外终端			
JFJ JFLJ	FSD 型中间接头	6/10、8.7/15 12/20	IEC 60502 GB 11033	1×25～1×1000 3×25～3×300
JZJ JZLJ	绕包型中间接头	26/35	GB 11033	1×50～1×1000 3×50～3×400
JYJ JYLJ	预制式中间连接	6/10、8.7/15 12/20、26/35	IEC 60502 GB 11033	1×25～1×1000 3×25～3×300
NRB WRB	绕包式户内终端 绕包式户外终端	0.6/1、3.6/6、6/6 6/10、8.7/10	JB 6486	1×25～1×1000 3×25～3×300

注 F 为 FSD 表示电场应力控制片式；N 表示户内；W 表示户外；Z 表示增绕绝缘；J 表示连接头。

表 5.1-98 电压 35kV 及以下挤包绝缘电缆附件的特点、试验参数和用途

型 号	特 点	主要试验参数	用 途
JFN—10 JFLN—10	安装简便，体积小，适用电缆规格范围广	局部放电：1.73U_0下<10pC 工频耐压：4.5$U_0$5min 2.5$U_0$500h 冲击耐压：95kV 正负各 10 次	用于较洁净环境，可在（－40～40)℃条件下运行，使用性能与连接电缆相同
IYN—10～35 JYLN—10～35 JYW—10～35 JYLW—10～35	预制组合式部件，安装简便，爬电距离大，耐污能力强，且可以根据环境条件增加雨裙数量，加大爬距，耐电蚀，耐紫外线能力强，并有阻燃性	局部放电：1.73U_0下<10pC 工频耐压：4.5$U_0$5min 2.5$U_0$500h 冲击耐压： 10kV 级 95kV 正负各 10 次 20kV 级 125kV 正负各 10 次 35kV 级 250kV 正负各 10 次	用于各种使用条件及环境，如变电所内部、户外及污秽环境，可在(－40～40)℃条件下运行，沿海、钢铁及石化行业均可应用，使用性能与连接电缆相同
JFJ—10～20 JFLJ—10～20	安装简便，结构尺寸小，性能稳定可靠、防水性能好	局部放电：1.73U_0下<10pC 工频耐压：4.5$U_0$5min 2.5$U_0$500h 冲击耐压： 10kV 级 95kV 正负各 10 次 20kV 级 125kV 正负各 10 次	与连接电缆相同

续表

型　号	特　点	主要试验参数	用　途
JZJ—35 JZLJ—35	性能稳定可靠，防水性能好，制作工艺技术要求高，工作量大	局部放电：1.73U_0下<10pC 工频耐压：4.5U_0 5min 2.5U_0 1008h 4$U_0$4h 冲击耐压： 35kV 级 250kV 正负各 10 次	与连接电缆相同
JYJ—10～35 JYLJ—10～35	整体预制，结构规整、安装简便	局部放电：1.73U_0下<10pC 工频耐压：4.5U_0 5min 2.5U_0 500h 冲击耐压： 10kV 级 95kV 正负各 10 次 20kV 级 125kV 正负各 10 次 35kV 级 250kV 正负各 10 次	与连接电线相同
NRB WRB	性能稳定可靠，防水性能好，制作工艺技术要求高，工作量大	工频耐压（干态和湿态）： U_0为 0.6kV 耐压 4kV 1min U_0为 3.6kV 耐压 25kV 1min U_0为 6kV 耐压 35kV 1min U_0为 8.7kV 耐压 45kV 1min 其余性能略	用于较洁净环境，可在（－40～40)℃条件下运行，使用性能与连接电缆相同，目前很少使用

3.4　额定电压 110kV 及以上自容式充油电缆附件

自容式充油电缆附件主要包括终端、连接盒、塞止式连接盒和压力箱。电缆附件参考型号（摘自企业标准）、名称见表 5.1-99。部分附件结构见图 5.1-12～图 5.1-17。

表 5.1-99　　自容式充油电缆附件型号和名称

参考型号	附件名称	备　注
CYZK	自容式充油电缆用开敞式终端	参考型号为部分工厂提供的产品型号，并未包含所有示意图的产品
CYZF	自容式充油电缆用 SF_6封闭式终端	
CYZX	自容式充油电缆用油封式终端	
CYZKG	自容式充油电缆用高落差敷设终端	
CYJT/CYJ	自容式充油电缆用普通接头（直线连接增绕绝缘）	
CYJS	自容式充油电缆用塞止式双室连接头（盒）	
CYXY1	自容式充油电缆用压力供油箱	

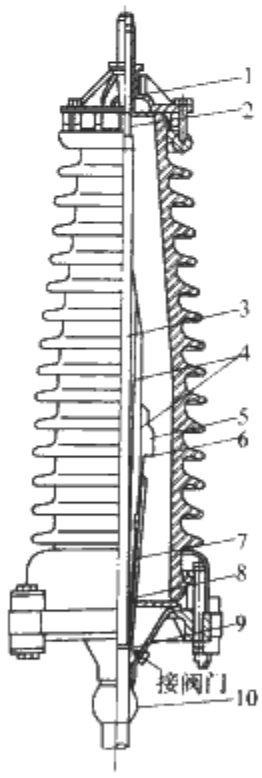


图 5.1-12　110～220kV 充油电缆环氧增强终端头示意图

1—出线梗；2—压接芯管；3—电缆绝缘；4—增绕绝缘；5—环氧增强件；6—瓷套；7—应力锥；8—环氧支撑架；9—支撑架固定扎线；10—铅封

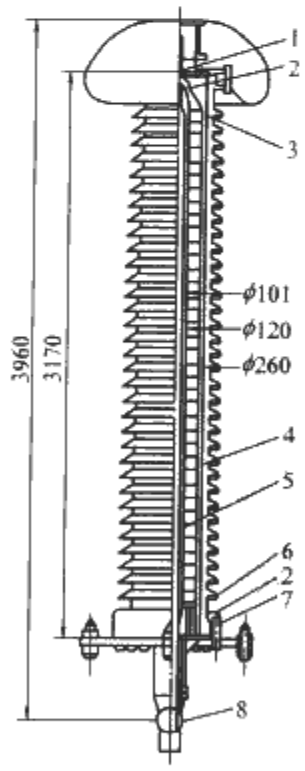


图 5.1-13　330kV 充油电缆电容饼式终端示意图

1—出线梗；2—引接软线；3—填充皱纹绝缘纸；4—电容饼；5—增绕绝缘；6—支撑板；7—应力锥屏蔽；8—铅封

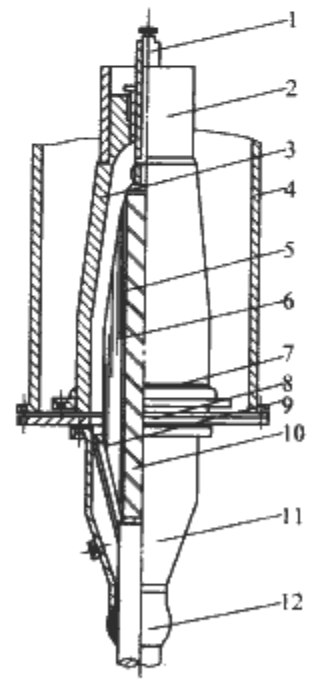


图 5.1-14　110～330kV 充油电缆全封闭终端示意图

1—出线梗；2—高压屏蔽；3—环氧树脂套管；4—外壳；5—增绕绝缘；6—油纸电容锥；7—套管法兰；8—底板；9—电容锥支撑架；10—电缆绝缘；11—尾管；12—铅封

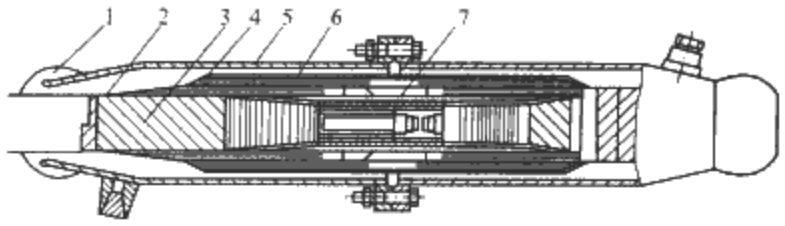


图 5.1-15 110～220kV 自容式充油电缆普通连接头示意图

1-铅封；2—电缆绝缘屏蔽；3—电缆绝缘；4-应力锥；5—外壳；6-增绕绝缘；7—压接管

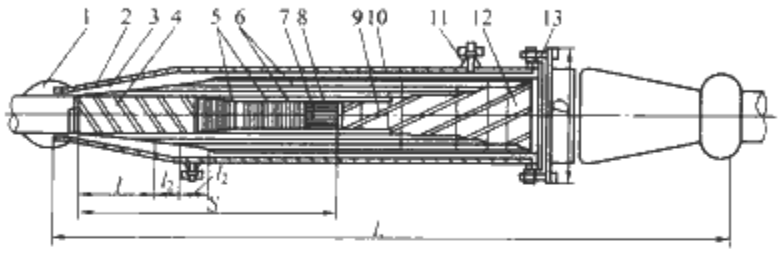


图 5.1-16 110kV 单室式塞止连接头示意图

1—铅封；2—接地屏蔽；3—半导电屏蔽；4—电缆；5—填充绝缘；6—增绕绝缘；7 芯管；8—压接管；9 油道；10—外壳；11—油嘴；12—环氧树脂塞止管；13—密封垫圈

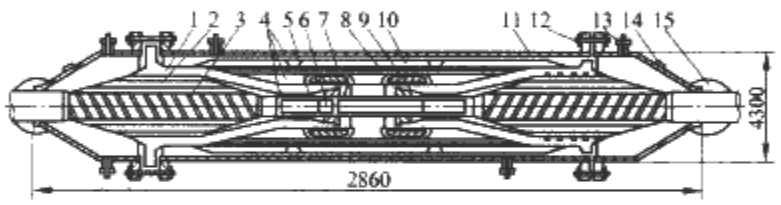


图 5.1-17 220kV 双室式塞止连接头示意图

1—环氧树脂套管；2—电缆增绕绝缘；3—电缆；4—填充绝缘；5—芯管；6-导体连接；7-带有绝缘的电极；8—轴封螺母；9—密封垫圈；10—外腔增绕绝缘；11—外壳；12—密封；13-油嘴；14-接地端子；15-铅封

续表

型号		产品名称
主型号	含副型号	
YJZGC	—	交联聚乙烯绝缘电力电缆含绝缘填充剂 GIS 终端
YJZGG	—	交联聚乙烯绝缘电力电缆干式绝缘 GIS 终端
YJZYC	—	交联聚乙烯绝缘电力电缆含绝缘填充剂油浸终端
YJZYG	—	交联聚乙烯绝缘电力电缆干式绝缘油浸终端
YJJTI	YJJTI0	交联聚乙烯绝缘电力电缆整体预制橡胶绝缘件直通接头，无保护盒
	YJJTI1	交联聚乙烯绝缘电力电缆整体预制橡胶绝缘件直通接头，玻璃钢保护盒含防水浇注剂
	YJJTI2	交联聚乙烯绝缘电力电缆整体预制橡胶绝缘件直通接头，绝缘铜壳保护盒
YJJTZ	YJJTZ0	交联聚乙烯绝缘电力电缆组合预制绝缘件直通接头，无保护盒
	YJJTZ1	交联聚乙烯绝缘电力电缆组合预制绝缘件直通接头，玻璃钢保护盒含防水浇注剂
	YJJTZ2	交联聚乙烯绝缘电力电缆组合预制绝缘件直通接头，绝缘铜壳保护盒
YJJJI	YJJJI0	交联聚乙烯绝缘电力电缆整体预制橡胶绝缘件接头，无保护盒
	YJJJI1	交联聚乙烯绝缘电力电缆整体预制橡胶绝缘件接头，玻璃钢保护盒含防水浇注剂
	YJJJI2	交联聚乙烯绝缘电力电缆整体预制橡胶绝缘件接头，绝缘铜壳保护盒
YJJJZ	YJJJZ0	交联聚乙烯绝缘电力电缆组合预制绝缘件接头，无保护盒
	YJJJZ1	交联聚乙烯绝缘电力电缆组合预制绝缘件接头，玻璃钢保护盒含防水浇注剂
	YJJJZ2	交联聚乙烯绝缘电力电缆组合预制绝缘件接头，绝缘铜壳保护盒

3.5 额定电压 66kV 及以上交联聚乙烯电缆附件

交联聚乙烯电缆附件主要包括终端、连接头。有关型号、产品名称见表 5.1-100。附件的特点、试验参数和用途见表 5.1-101。部分产品结构见图 5.1-18～图 5.1-21。

表 5.1-100 110kV 及 220kV 交联聚乙烯电缆附件（按 GB/T 11017.3）

型号		产品名称
主型号	含副型号	
YJZWC	YJZWC1	交联聚乙烯绝缘电力电缆含绝缘填充剂户外终端，外绝缘污秽等级Ⅰ级
	YJZWC2	交联聚乙烯绝缘电力电缆含绝缘填充剂户外终端，外绝缘污秽等级Ⅱ级
	YJZWC3	交联聚乙烯绝缘电力电缆含绝缘填充剂户外终端，外绝缘污秽等级Ⅲ级
	YJZWC4	交联聚乙烯绝缘电力电缆含绝缘填充剂户外终端，外绝缘污秽等级Ⅳ级
YJZWQ	YJZWQ1	交联聚乙烯绝缘电力电缆 SF_6 充气绝缘户外终端，外绝缘污秽等级Ⅰ级
	YJZWQ2	交联聚乙烯绝缘电力电缆 SF_6 充气绝缘户外终端，外绝缘污秽等级Ⅱ级
	YJZWQ3	交联聚乙烯绝缘电力电缆 SF_6 充气绝缘户外终端，外绝缘污秽等级Ⅲ级
	YJZWQ4	交联聚乙烯绝缘电力电缆 SF_6 充气绝缘户外终端，外绝缘污秽等级Ⅳ级

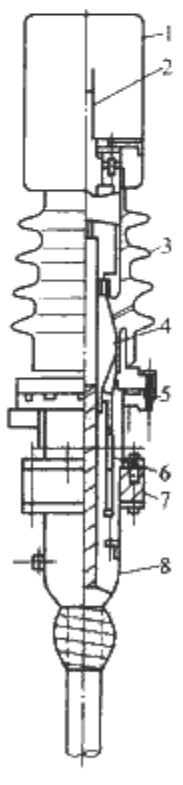


图 5.1-18 220kV 交联电缆变压器终端示意图

1—终端顶端；2—环氧绝缘；3—环氧树脂套管；4—应力锥；5—金属底座；6—压缩装置；7—绝缘法兰；8—保护装置

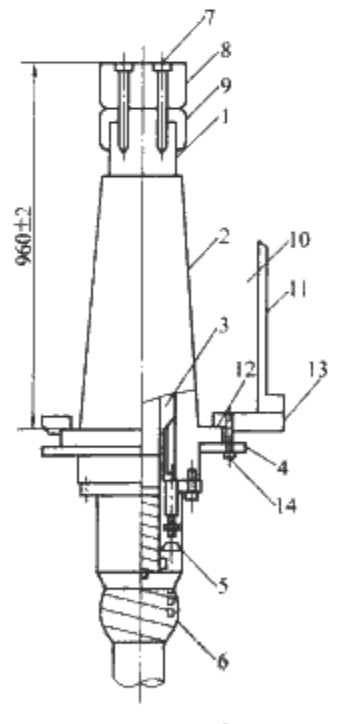


图 5.1-19 220kV GIS 终端示意图

1—屏蔽帽；2-导体引出棒；3—应力锥；4—紧固件；5—防水带；6—电缆保护管；7—固定螺；8—屏蔽罩；9—顶帽；10—SF_6气体；11—外壳；12—O 形圈；13—连接法兰；14—夹紧螺

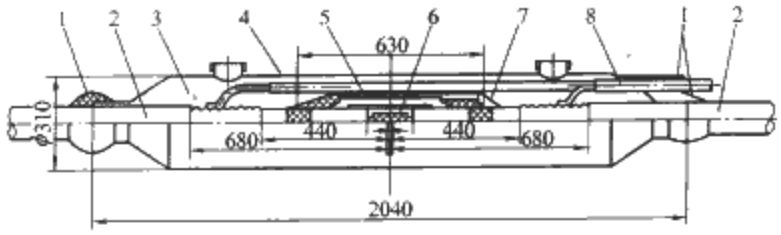


图 5.1-20　110kV 整体橡胶预制接头示意图

1—密封带；2—电缆；3—灌封胶；4—保护壳体；5—橡胶绝缘件；6—导体压接管；7—热收缩管；8—同轴电缆

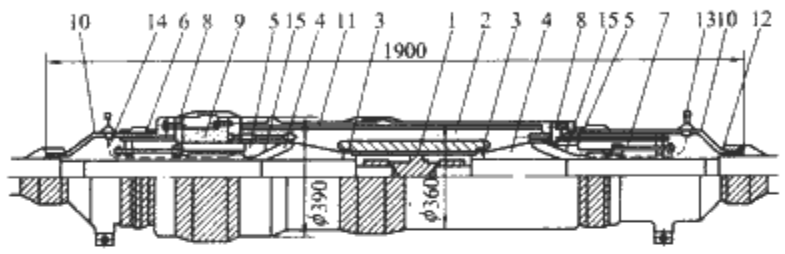


图 5.1-21　三件式预制接头示意图

1—导体压接管；2—环氧元件；3—塞止；4—橡胶预制件；5—压紧管；6—压紧金具 A；7—压紧金具 B；8—中间法兰；9—环氧绝缘筒；10—电缆保护金具；11—防护层；12—防护绕包带；13—局放测试端子；14—局放测试端子；15—局放测试端子

表 5.1-101　电压 66kV～220kV 挤包绝缘电缆附件的特点、试验参数和用途

型号	特　点	主要试验参数	用　途
YJZWC YJZWQ	预制式橡胶应力锥，性能可靠，结构部件少，安装简便，适用截面范围大，瓷套为组合式防污型伞裙，防污效果好	局部放电：1.5U_0 下小于 5pC 工频耐压：（湿态 1min） 66kV 级升至 140kV 110kV 级升至 185kV 220kV 级升至 360kV 冲击耐压 66kV 级 350kV 正负各 10 次 110kV 级 550kV 正负各 10 次 220kV 级 550kV 正负各 10 次。 20 次恒压负荷循环试验 2U_0 电压下。开始升温，至 100℃共 8h；然后开始冷却，至室温共 16h	用于空气绝缘的户内、户外环境，具有防轻污和重污瓷套。可在－40～40℃条件下运行，使用性能与连接电缆相同
YJZGC YJZGG	预制式橡胶应力锥，性能可靠，环氧树脂外绝缘质量稳定，结构部件少，安装简便，适用电缆截面范围大		用于与 GIS、SF6 组合电器开关配套的电缆终端，可在 0.3～0.5MPa SF6 压力下工作，使用性能与连接电缆相同
YJZYC YJZYG	预制式橡胶应力锥，性能可靠，密封性好，结构部件少，安装简便，适用电缆规格范围大		用于与变压器连接、变压器油绝缘电缆终端，使用性能与连接电缆相同
YJJTI YJJTZ	整体预制橡胶应力元件，结构设计合理，结构简便，安装方便，性能可靠		应用于电缆的直通连接。适用于隧道、沟道及直埋敷设条件。使用性能与所连接电缆相同
YJJJI YJJJZ	组合预制式环氧绝缘体及橡胶应力锥，性能可靠，设计裕度大，有弹簧压缩装置，可长期保持应力锥与环氧绝缘体的界面压力，以保持长期运行的可靠性		应用于电缆的直通及屏蔽换位连接。适用于隧道、沟道及直埋敷设条件。使用性能与所连接电缆相同

4　电力电缆和低压配电用电线电缆连续负荷载流量

电力电缆和低压配电用电线电缆（以前称布电线）的连续负荷载流量原则上按照 IEC 计算。常用载流量见考表 5.1-102～表 5.1-128。仅供参考。

4.1　聚氯乙烯绝缘电缆载流量

表 5.1-102　单芯非铠装聚氯乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—1　A

型　号	VV VLV VY VLY（导体温度 70℃）									
电压（kV）	0.6/11.8/3									
排列	3 根电缆三角形紧靠排列									
敷设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
2.5	25	19	36	27	33	25	30	21	25	17
4	33	26	47	35	43	32	39	28	33	23
6	41	34	58	46	53	41	48	36	41	29
10	57	44	78	58	71	52	65	46	55	38
16	76	59	100	76	92	68	84	60	72	49
25	98	76	130	98	115	87	105	77	93	64
35	115	90	155	115	140	105	125	93	110	77
50	145	110	185	145	165	125	150	110	130	93
70	180	140	225	170	200	150	185	135	165	115
95	225	175	270	205	240	180	225	165	200	140
120	260	200	310	235	275	205	255	190	230	160
150	300	230	350	265	310	235	290	215	260	185
185	345	270	395	300	350	265	325	245	295	210
240	410	320	455	350	405	310	380	280	340	245
300	475	370	515	395	455	350	430	320	385	280
400	555	440	585	455	515	400	485	370	440	320
500	640	510	660	520	580	455	550	420	495	365
630	730	595	740	590	650	520	615	475	555	415
800	830	690	820	665	720	580	675	535	615	470
1000	—	780	—	735	—	645	—	595	—	520

表 5.1-103　单芯非铠装聚氯乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—2　A

型　号	VV VLV VY VLY（导体温度 70℃）									
电压（kV）	0.6/11.8/3									
排列	3 根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）									
敷设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	24	—	29	—	28	—	28	—	28	—
2.5	31	24	38	30	37	29	36	28	36	28
4	41	32	49	39	47	37	47	37	47	37
6	52	42	61	50	58	48	58	47	58	47
10	72	55	83	64	78	60	77	59	76	59

续表

型 号	VV VLV VY VLY（导体温度 70℃）									
电压（kV）	0.6/11.8/3									
排列	3根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）									
敷设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
16	95	73	105	83	100	77	99	76	98	76
25	120	96	135	105	125	99	125	98	125	97
35	150	115	160	125	150	115	150	115	145	115
50	180	140	195	150	175	135	175	135	175	135
70	230	175	240	185	215	170	215	165	210	165
95	280	215	285	220	260	200	255	200	255	195
120	325	250	325	250	295	230	290	225	290	225
150	375	290	565	285	330	255	325	255	325	250
185	430	335	415	320	375	290	370	285	365	285
240	510	395	480	375	435	340	430	335	425	330
300	585	455	545	425	495	385	485	380	480	375
400	690	540	625	490	565	440	555	435	550	430
500	800	630	710	560	640	505	630	500	625	495
630	920	740	810	645	730	580	715	570	710	565
800	1060	860	910	735	820	660	805	650	795	640
1000	—	980	—	825	—	740	—	730	—	720

表 5.1-104 单芯非铠装聚氯乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—3 A

型 号	VV VLV VY VLY（导体温度 70℃）									
电压（kV）	3.6/66/66/10									
排列	3根电缆三角形紧靠排列									
敷设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
10	59	45	74	55	71	53	67	49	60	42
16	77	60	96	72	91	68	86	63	77	54
25	99	77	120	92	115	87	105	80	98	69
35	120	93	145	110	135	100	130	95	115	82
50	145	110	170	130	160	120	150	110	135	97
70	180	140	210	160	195	150	185	135	165	115
95	215	170	255	190	235	175	220	160	200	140
120	250	195	290	220	265	200	250	185	225	160
150	285	220	325	245	295	225	280	205	250	175
185	330	255	365	280	330	250	315	230	280	200
240	385	300	425	325	385	290	360	265	325	230
300	445	345	480	365	430	330	405	300	360	260
400	520	410	545	420	485	375	455	345	410	295
500	595	475	615	480	545	425	510	390	460	335
630	680	550	690	545	610	480	570	440	510	375
800	770	635	760	615	670	540	625	490	560	420
1000	860	720	825	680	725	595	680	540	605	460

表 5.1-105 单芯非铠装聚氯乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—4 A

型 号	VV VLV VY VLY（导体温度 70℃）									
电压（kV）	36/66/66/10									
排列	3根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）									
敷设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
10	69	53	76	59	76	58	75	58	75	58
16	90	70	99	76	97	75	97	75	96	75
25	115	90	125	98	120	96	120	95	120	95
35	140	110	150	115	145	110	145	110	145	110
50	170	130	180	140	170	130	170	130	170	130
70	210	165	220	170	210	160	205	160	205	160
95	260	200	265	205	250	195	245	190	245	190
120	300	230	300	235	285	220	280	215	280	215
150	340	265	340	265	315	245	315	245	310	240
185	395	300	385	300	360	280	355	275	350	275
240	465	360	445	345	415	320	410	320	405	315
300	535	415	505	395	465	365	460	360	455	355
400	630	490	580	455	530	415	525	410	520	405
500	730	575	660	520	600	475	595	470	590	465
630	845	670	750	595	680	540	670	535	665	530
800	970	780	840	680	760	615	750	505	740	600
1000	1090	895	930	760	835	685	825	675	815	670

表 5.1-106 3芯、4芯和5芯非铠装聚氯乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—1 A

型 号	VV VLV VY VLY（导体温度 70℃）									
电压（kV）	0.6/11.8/3									
敷设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.2		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	15	—	19	—	17	—	15	—	13	—
2.5	19	13	27	19	25	17	23	15	19	13
4	25	19	36	27	33	25	30	21	25	17
6	33	26	47	35	43	32	39	28	33	23
10	41	34	58	46	53	41	48	36	41	29
16	57	44	78	58	71	52	65	46	55	38
25	76	59	100	76	92	68	84	60	72	49
35	98	76	130	98	115	87	105	77	93	64
50	115	90	155	115	140	105	125	93	110	77
70	145	110	185	145	165	125	150	110	130	93
95	180	140	225	170	200	150	185	135	165	115
120	225	175	270	205	240	180	225	165	200	140
150	260	200	310	235	275	205	255	190	230	160
185	300	230	350	265	310	235	290	215	260	185
240	345	270	395	300	350	265	325	245	295	210

表 5.1-107　3 芯、4 芯和 5 芯非铠装聚氯乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—2　A

型　号	VV VLV VY VLY（导体温度 70℃）									
电压（kV）	3.6/6									
敷设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.2		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
10	47	36	69	45	57	42	54	40	48	34
16	59	45	74	55	71	53	67	49	60	42
25	77	60	96	72	91	68	86	63	77	54
35	99	77	120	92	115	87	105	80	98	69
50	120	93	145	110	135	100	130	95	115	82
70	145	110	170	130	160	120	150	110	135	97
95	180	140	210	160	195	150	185	135	165	115
120	215	170	255	190	235	175	220	160	200	140
150	250	195	290	220	265	200	250	185	225	160
185	285	220	325	245	295	225	280	205	250	175
240	330	255	365	280	330	250	315	230	280	200

4.2　交联聚乙烯绝缘电缆载流量

表 5.1-108　单芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—1　A

型　号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	0.6/11.8/3									
排列	3 根电缆三角形紧靠排列									
敷设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	26	—	33	—	28	—	25	—	21	—
2.5	34	26	43	32	36	27	32	23	27	18
4	44	35	56	42	47	35	42	30	35	24
6	56	45	70	54	58	45	52	39	43	31
10	77	59	94	69	77	57	69	49	58	40
16	100	78	120	90	100	74	89	64	76	52
25	130	100	155	115	125	95	115	83	98	68
35	160	125	185	135	150	110	135	99	115	82
50	195	150	220	165	80	135	160	115	140	98
70	245	190	270	200	220	165	200	145	175	120
95	300	230	320	240	260	195	240	175	210	145
120	350	370	365	275	300	225	275	200	240	170
150	400	310	410	310	335	255	310	225	275	195
185	465	360	465	355	380	285	350	260	310	220
240	550	430	540	410	440	335	405	300	360	260
300	635	495	610	465	495	375	460	340	410	295
400	745	590	695	535	560	435	520	395	465	340
500	860	685	780	610	635	495	590	450	525	390
630	990	800	880	695	710	565	660	510	590	445
800	1120	930	970	785	790	635	735	580	655	500
1000	1260	1050	1060	875	860	705	800	645	720	555

表 5.1-109　单芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—2　A

型　号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	0.6/1 1.8/3									
排列	3 根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）									
敷　设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	32	—	45	—	44	—	44	—	44	—
2.5	42	33	59	46	57	45	57	44	57	44
4	56	44	77	61	74	58	73	58	73	57
6	70	57	97	79	92	75	91	74	91	74
10	97	75	130	100	120	95	120	94	120	93
16	125	99	170	135	160	120	155	120	155	120
25	165	125	220	170	200	155	200	155	195	150
35	200	155	265	205	240	185	240	185	235	180
50	245	190	320	245	285	220	280	220	275	215
70	305	240	395	305	350	270	345	265	340	265
95	375	290	475	370	420	325	410	320	405	315
120	435	340	545	420	480	370	470	365	460	355
150	500	390	610	475	535	415	525	405	515	400
185	580	450	695	540	605	470	595	460	585	455
240	685	535	810	630	705	545	690	535	675	525
300	795	615	910	710	795	620	780	605	765	595
400	930	730	1050	820	910	710	890	695	870	685
500	1080	850	1190	940	1030	815	1010	795	990	780
630	1250	1000	1350	1180	1170	930	1140	910	1120	895
800	1440	1160	1520	1220	1310	1050	1280	1030	1260	1010
1000	1630	1330	1690	1380	1450	1180	1420	1160	1390	1140

表 5.1-110　单芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—3　A

型　号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	3.6/6～12/20									
排列	3 根电缆三角形紧靠排列									
敷　设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
25	140	110	150	115	130	99	120	89	105	75
35	170	135	180	135	155	115	140	105	125	90
50	205	160	215	160	180	135	170	125	150	105
70	260	200	265	200	220	165	205	150	180	130
95	315	245	315	240	265	200	245	180	215	155
120	360	280	360	270	300	225	275	205	245	175
150	410	320	405	305	335	255	310	230	275	195
185	470	365	455	345	380	285	350	260	310	220
240	555	435	530	400	440	330	405	300	360	255
300	640	500	595	455	495	375	455	340	405	290
400	745	585	680	520	560	430	515	385	460	330
500	855	680	765	595	630	490	585	440	520	375
630	980	790	860	680	710	555	655	500	580	430
800	1100	910	950	765	785	625	725	565	645	485
1000	1230	1030	1040	850	850	695	785	625	700	535
1200	1320	1120	1100	910	900	745	830	670	735	575

表 5.1-111 单芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—4 A

型 号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	3.6/6～12/20									
排列	3根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）									
敷 设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm^2)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
25	165	130	160	120	140	110	135	105	135	105
35	205	155	190	145	165	130	160	125	160	125
50	245	190	225	175	195	150	190	150	190	145
70	305	235	275	215	240	185	235	180	230	180
95	370	290	330	255	285	220	280	215	275	210
120	430	335	375	290	325	250	315	245	310	240
150	490	380	425	330	365	280	355	275	345	270
185	560	435	480	370	410	320	400	310	390	305
240	665	515	555	435	475	370	460	360	455	350
300	765	595	630	490	535	415	520	405	510	400
400	890	695	725	565	610	480	595	465	585	455
500	1030	810	825	650	695	550	680	535	665	525
630	1190	950	940	745	790	625	770	610	755	600
800	1370	1100	1050	850	890	715	865	695	850	680
1000	1540	1260	1170	950	980	800	950	780	940	765
1200	1670	1380	1250	1040	1050	870	1020	845	1000	830

表 5.1-112 单芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—5 A

型 号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	18/20～26/35									
排列	3根电缆三角形紧靠排列									
敷 设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm^2)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
50	220	170	215	165	190	140	175	130	160	110
70	270	210	265	200	230	175	215	160	190	135
95	330	255	315	240	275	205	255	190	230	160
120	375	290	360	270	310	235	290	215	260	185
150	425	330	400	305	345	260	320	240	290	205
185	485	380	455	345	390	295	360	270	325	230
240	560	435	525	400	450	340	420	310	375	265
300	650	510	595	455	505	385	470	350	420	300
400	760	595	680	525	580	440	535	400	480	345
500	875	690	775	600	655	505	605	455	540	390
630	1000	800	875	685	735	575	680	520	610	445
800	1130	920	970	770	815	645	755	585	675	500
1000	1250	1040	1060	860	885	715	820	650	730	555
1200	1350	1130	1120	920	930	770	870	695	770	595

表 5.1-113 单芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—6 A

型 号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	18/20～26/35									
排列	3根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）									
敷 设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm^2)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
50	245	190	225	175	200	155	200	155	195	150
70	305	235	275	215	245	190	240	185	240	185
95	370	285	330	255	295	225	290	225	285	220
120	425	330	375	290	335	260	325	255	320	250
150	485	375	420	325	375	290	365	285	360	280
185	555	430	475	370	420	325	410	320	405	315
240	650	505	555	430	485	380	475	370	470	365
300	745	580	630	490	550	425	535	415	530	410
400	870	680	720	565	630	490	615	480	605	470
500	1000	790	825	645	715	560	700	550	685	540
630	1160	920	940	740	810	640	790	625	780	615
800	1330	1060	1060	845	910	730	890	710	875	700
1000	1490	1210	1170	950	1010	820	980	800	960	785
1200	1620	1340	1280	1030	1070	890	1050	865	1030	850

表 5.1-114 单芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—7 A

型 号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	64/110									
排列	3根电缆三角形紧靠排列									
敷 设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.2		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm^2)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
240	570	445	500	385	435	330	410	305	370	265
300	650	505	565	435	490	375	455	340	410	295
400	750	590	645	495	550	425	515	385	460	335
500	860	680	730	565	620	480	580	440	520	380
630	980	790	820	645	695	545	645	495	580	425
800	1110	900	910	725	765	610	715	555	635	475
1000	1240	1020	1000	810	835	675	775	630	690	525
1200	1330	1120	1050	870	880	725	815	655	730	560

表 5.1-115 单芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—8 A

型 号	YJV YJLV YJY YJLY									
电压（kV）	64/110									
排列	3根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）									
敷 设	空气中（40℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.0		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm^2)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
240	630	490	525	410	470	365	460	360	455	355
300	725	560	595	465	530	410	520	405	510	395
400	840	655	680	535	600	470	585	460	575	450
500	970	765	775	610	680	535	665	520	650	515
630	1120	890	889	700	765	610	750	595	735	585
800	1280	1030	990	795	855	685	835	670	820	660
1000	1450	1170	1090	895	940	770	920	750	900	735
1200	1570	1290	1170	970	1000	830	980	810	960	795

表 5.1-116　3 芯、4 芯和 5 芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—1　A

型　号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	0.6/1 1.8/3									
敷　设	空气中（45℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.2		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	21	—	27	—	24	—	20	—	17	—
2.5	26	21	33	27	28	24	25	20	21	16
4	34	26	43	32	36	27	32	23	27	18
6	44	35	56	42	47	35	42	30	35	24
10	56	45	70	54	58	45	52	39	43	31
16	77	59	94	69	77	57	69	49	58	40
25	100	78	120	90	100	74	89	64	76	52
35	130	100	155	115	125	95	115	83	98	68
50	160	125	185	135	150	110	135	99	115	82
70	195	150	220	165	180	135	160	115	140	98
95	245	190	270	200	220	165	200	145	175	120
120	300	230	320	240	260	195	240	175	210	145
150	350	370	365	275	300	225	275	200	240	170
185	400	310	410	310	335	255	310	225	275	195
240	465	360	465	355	380	285	350	260	310	220
300	550	430	540	410	440	335	405	300	360	260

表 5.1-117　3 芯、4 芯和 5 芯交联聚乙烯绝缘电力电缆连续负荷载流量—2　A

型　号	YJV YJLV YJY YJLY（导体温度 90℃）									
电压（kV）	3.6/6～8.7/10									
敷　设	空气中（45℃）		土壤中（K·m/W）（25℃）							
			ρ_W		ρ_D（水分迁移）					
			1.2		2.5		3.0		3.5	
截面积(mm²)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
25	115	90	120	92	105	80	100	70	85	60
35	140	110	150	115	130	100	120	85	105	75
50	170	135	180	135	155	115	140	105	125	90
70	205	160	215	160	180	135	170	125	150	105
95	260	200	265	200	220	165	205	150	180	130
120	315	245	315	240	265	200	245	180	215	155
150	360	280	360	270	300	225	275	205	245	175
185	410	320	405	305	335	255	310	230	275	195
240	470	365	455	345	380	285	350	260	310	220

4.3　自容式充油电缆载流量

表 5.1-118　单芯非铠装充油电缆连续负荷载流量—1　A

型　号	CYZQ102 CYZQ302（85℃）				
电压（kV）	110				
排　列	3 根电缆三角形紧靠排列				
敷　设	空气中（40℃）	土壤中（K·m/W）（25℃）			
		ρ_W	ρ_D（水分迁移）		
		1.0	2.5	3.0	3.5
截面积(mm²)	铜	铜	铜	铜	铜
120	370	340	300	295	290
150	420	380	335	330	325
185	480	430	375	370	365
240	555	495	435	425	415

续表

型　号	CYZQ102 CYZQ302（85℃）				
电压（kV）	110				
排　列	3 根电缆三角形紧靠排列				
敷　设	空气中（40℃）	土壤中（K·m/W）（25℃）			
		ρ_W	ρ_D（水分迁移）		
		1.0	2.5	3.0	3.5
截面积(mm²)	铜	铜	铜	铜	铜
300	635	560	490	475	470
400	735	640	555	545	535
500	850	730	630	615	605
630	980	830	715	700	685
800	1120	940	805	785	770
1000	1260	1040	890	870	855

表 5.1-119　单芯非铠装充油电缆连续负荷载流量—2　A

型　号	CYZQ102 CYZQ302（85℃）				
电压（kV）	110				
排　列	3 根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）				
敷　设	空气中（40℃）	土壤中（K·m/W）（25℃）			
		ρ_W	ρ_D（水分迁移）		
		1.0	2.5	3.0	3.5
截面积(mm²)	铜	铜	铜	铜	铜
120	415	350	310	305	300
150	475	395	350	340	335
185	540	445	395	385	380
240	630	515	455	445	435
300	720	580	510	500	490
400	845	670	585	570	560
500	980	765	665	650	640
630	1140	880	760	740	730
800	1320	1000	865	845	830
1000	1500	1130	970	950	930

表 5.1-120　单芯非铠装充油电缆连续负荷载流量—3　A

型　号	CYZQ102 CYZQ302（85℃）				
电压（kV）	220				
排　列	3 根电缆三角形紧靠排列				
敷　设	空气中（40℃）	土壤中（K·m/W）（25℃）			
		ρ_W	ρ_D（水分迁移）		
		1.0	2.5	3.0	3.5
截面积(mm²)	铜	铜	铜	铜	铜
120	350	320	285	280	275
150	390	355	320	310	305
185	445	400	355	350	345
240	515	465	410	400	395
300	590	520	460	450	440
400	685	595	520	505	500
500	785	675	590	575	565
630	900	770	665	650	640
800	1040	870	745	730	715
1000	1170	970	825	805	790

表 5.1-121 单芯非铠装充油电缆连续负荷载流量—4 A

型 号	CYZQ102 CYZQ302（85℃）				
电压（kV）	220				
排 列	3根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）				
敷 设	空气中（40℃）	土壤中（K·m/W）（25℃）			
		ρ_W	ρ_D（水分迁移）		
		1.0	2.5	3.0	3.5
截面积(mm^2)	铜	铜	铜	铜	铜
120	385	330	300	295	290
150	435	370	335	325	325
185	495	415	375	365	360
240	575	480	430	420	415
300	655	545	485	475	465
400	765	620	550	540	530
500	885	710	625	610	600
630	1020	815	710	605	685
800	1190	930	805	790	775
1000	1360	1040	900	880	865

表 5.1-122 单芯非铠装充油电缆连续负荷载流量—5 A

型 号	CYZQ102 CYZQ302（85℃）				
电压（kV）	330				
排 列	3根电缆三角形紧靠排列				
敷 设	空气中（40℃）	土壤中（K·m/W）（25℃）			
		ρ_W	ρ_D（水分迁移）		
		1.0	2.5	3.0	3.5
截面积(mm^2)	铜	铜	铜	铜	铜
120	325	290	260	255	250
150	365	325	290	280	275
185	415	365	320	315	310
240	480	420	365	360	350
300	545	475	410	400	390
400	630	535	460	445	435
500	720	610	515	500	490
630	830	690	580	560	545
800	950	775	640	620	605
1000	1070	860	705	680	660

表 5.1-123 单芯非铠装充油电缆连续负荷载流量—6 A

型 号	CYZQ102 CYZQ302（85℃）				
电压（kV）	330				
排 列	3根电缆平行间隔排列（间隔距离等于电缆直径）				
敷 设	空气中（40℃）	土壤中（K·m/W）（25℃）			
		ρ_W	ρ_D（水分迁移）		
		1.0	2.5	3.0	3.5
截面积(mm^2)	铜	铜	铜	铜	铜
120	355	305	275	270	265
150	400	340	305	300	295
185	455	380	340	335	330
240	530	440	390	385	375
300	605	495	440	430	420
400	700	565	495	480	470
500	810	645	555	545	530
630	940	735	630	615	600
800	1090	835	705	685	670
1000	1240	930	785	760	740

4.4 室内配电用电线和移动电缆载流量

室内配电用电线和移动电缆主要是指电压为450/750V的低压电线电缆，大致包括：橡皮绝缘玻璃丝编织涂沥青电线；聚氯乙烯绝缘电线；聚氯乙烯绝缘及护套电线；橡套电缆等产品。交联聚烯烃绝缘电线和交联聚氯乙烯绝缘电线等也可借鉴采用。若其导体额定温度较高，可依据电缆载流量的修正系数进行换算。

表 5.1-124 固定敷设橡皮绝缘电线连续负荷载流量 A

型 号	BX BLX（导体温度65℃）							
电压（V）	450/750							
芯 数	3根单芯电线				单根2芯电线		单根3芯电线	
空气中（40℃）	3线排成三角形		3线排成平行线		单 根		单 根	
截面积(mm^2)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	14	—	20	—	16	—	14	—
2.5	19	15	26	21	23	18	19	15
4	25	20	35	28	30	24	26	20
6	32	26	45	35	39	31	33	26
10	46	35	62	48	55	42	46	35
16	62	48	83	65	73	56	62	48
25	85	66	110	87	96	76	83	65
35	105	82	140	105	120	93	100	80
50	130	100	170	130	145	110	125	98
70	165	130	215	165	185	145	160	125
95	210	160	265	205	225	175	200	155
120	245	190	310	240	265	205	330	180
150	285	220	360	275	—	—	—	—
185	330	255	410	320	—	—	—	—
240	395	310	490	385	—	—	—	—
300	460	360	560	445	—	—	—	—
400	535	425	670	525	—	—	—	—

表 5.1-125 固定敷设聚氯乙烯绝缘电线连续负荷载流量—1 A

型 号	BV BLV（导体温度70℃）							
电压（V）	450/750							
芯 数	单 芯							
空气中（40℃）	2线排成平行线		3线排成三角形		3线排成平行线		3线排成间隔平行线	
截面积(mm^2)	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	19	16	14	11	14	11	20	16
2.5	26	20	19	15	20	16	27	21
4	34	28	26	20	27	21	36	28
6	44	35	33	26	34	27	46	36
10	62	48	48	36	49	37	64	49
16	85	65	65	50	67	52	86	66
25	110	87	88	69	91	71	115	90
35	135	105	110	86	115	89	140	110
50	170	130	135	105	140	110	175	135
70	220	165	175	135	180	140	225	175
95	270	210	220	170	225	175	275	215
120	320	245	260	200	265	205	325	250
150	360	285	305	230	310	240	370	290
185	425	325	355	270	360	280	430	335
240	510	390	420	325	435	340	515	400
300	570	455	490	380	510	395	600	465
400	690	540	580	455	600	470	700	550

表 5.1-126　固定敷设聚氯乙烯绝缘电线连续负荷载流量—2　A

型　号	BV（导体温度 105℃）			
电压（V）	450/750			
芯　数	单　芯			
空气中（40℃）	2 线排成平行线	3 线排成三角形	3 线排成平行线	3 线排成间隔平行线
截面积(mm^2)	铜	铜	铜	铜
0.5	15	11	11	16
0.75	19	13	14	20
1.0	23	16	17	24
1.5	29	21	22	30
2.5	40	29	30	41
4	53	39	40	54
6	67	51	52	70

表 5.1-127　聚氯乙烯绝缘及护套电缆连续负荷载流量　A

型　号	BVV BLVV·BVVB BLVVB（导体温度 70℃）						
电压（V）	3005/500						
空气中（40℃）	单根敷设						
芯　数	1　芯	2　芯		3　芯		4　芯	5 芯
截面积(mm^2)	铜	铜	铝	铜	铝	铜	铜
0.75	15	—	—	9	—	—	—
1	17	—	—	11	—	—	—
1.5	22	18	—	16	—	14	13
2.5	30	25	20	21	27	20	18
4	39	33	26	28	22	26	24
6	50	43	34	36	29	33	31
10	69	59	45	51	39	46	43
16	—	105	—	68	—	61	57
25	—	125	—	91	—	82	77
35	—	—	—	110	—	100	95

表 5.1-128　通用橡套软电缆连续负荷载流量　A

型　号	YQ YQW YZ YZW YC YCW				
电压（V）	450/750				
空气中（40℃）	单根敷设				
芯　数	1　芯	2　芯	3　芯	4　芯	5　芯
截面积(mm^2)	铜	铜	铜	铜	铜
1.5	20	16	14	13	12
2.5	27	23	19	18	16
4	36	30	26	24	22
6	47	39	33	30	28
10	65	55	47	43	40
16	85	73	62	56	53
25	115	96	83	71	79
35	145	120	100	98	—
50	175	145	125	115	—
70	220	185	160	140	—
95	265	220	195	170	—
120	310	—	225	195	—
150	360	—	255	220	—
185	410	—	—	—	—
240	490	—	—	—	—
300	560	—	—	—	—
400	670	—	—	—	—

4.5　电缆载流量的修正系数

当空气温度、土壤温度和热阻系数不同时，载流量可按表 5.1-129、表 5.1-130 和表 5.1-131 修正。

表 5.1-129　不同环境温度下载流量修正系数—1

导体工作温度（℃）	环境温度（空气中）（℃）								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
60	1.58	1.50	1.41	1.42	1.22	1.11	1.00	0.86	0.73
65	1.48	1.41	1.44	1.26	1.18	1.09	1.00	0.89	0.77
70	1.41	1.45	1.29	1.22	1.15	1.08	1.00	0.91	0.81
89	1.42	1.27	1.22	1.17	1.11	1.06	1.00	0.93	0.86
90	1.26	1.22	1.18	1.14	1.09	1.04	1.00	0.94	0.89
105	1.22	1.19	1.15	1.11	1.08	1.04	1.00	0.95	0.91

表 5.1-130　不同环境温度下载流量修正系数—2

导体工作温度（℃）	环境温度（土壤中）（℃）					
	10	15	20	25	30	35
60	1.20	1.13	1.07	1.00	0.93	0.85
65	1.17	1.12	1.06	1.00	0.94	0.87
70	1.15	1.01	1.05	1.00	0.94	0.88
89	1.13	1.09	1.04	1.00	0.95	0.90
90	1.11	1.07	1.04	1.00	0.96	0.92

表 5.1-131　不同土壤热阻系数的载流量修正系数

电　压（kV）	导体截面积（mm^2）	土壤热阻系数（ρ_T）（K·m/W）				
		0.8	1.0	1.2	1.5	2.0
0.6/1～6/6	≤35	1.06	1.00	0.95	0.88	0.80
	50～150	1.08	1.00	0.94	0.87	0.77
	≥185	1.09	1.00	0.93	0.85	0.76
6/10～12/15	≤35	1.05	1.00	0.95	0.89	0.80
	50～150	1.06	1.00	0.94	0.88	0.79
	≥185	1.07	1.00	0.93	0.86	0.77
12/20～26/35	≤95	1.05	1.00	0.95	0.90	0.82
	≥120	1.06	1.00	0.94	0.83	0.80

5　电力电缆常用试验方法

最常用的电力电缆试验方法为：局部放电试验；冲击电压试验；介质损耗角正切测量；交流电压试验；直流电压试验；绝缘电阻试验；表面绝缘电阻试验等。以上方法可详细参考 GB/T 3048 标准。

5.1　局部放电试验

（1）试验设备。试验回路由高压电源、高压电压表、耦合电容器、测量回路、放电量校准器、双脉冲发生器等组成，如有必要，还包括终端阻抗或反射抑制器。试验设备所有部件的噪声水平应足够低，以得到所要求的灵敏度。高压电压表很少采用，通常用耦合电容器组成分压器来测量高电压。高压电源除了采用试验变压器外，推荐采用串联谐振装置产生试验电压。不论采用何种方式，试验电源都应满足试样试验所需的电压和电容电流的要求。试验电源应是频率为 45～65Hz 的交流电源，试验电压波形为 2 个半波相同的近似正弦波。

（2）试验回路和仪器。试验回路包括试样，耦合电容器

和测量回路。测量回路由测量阻抗（测量仪器的输入阻抗和选定与电缆阻抗匹配的输入单元），连接导线和测量仪器等组成。测量仪器或检测器包括合适的放大器，示波器，另外可根据需要增加仪器指示局部放电的存在，并测出视在电荷。

局部放电测试回路的特性需用双脉冲发生器进行校核，双脉冲应与工频同步，2 个结对且相等的脉冲，其间隔时间应从 0.2～100μs 连续可调，脉冲的前沿（上升时间）应不超过 20 ns，从 10% 波头值到 10%波尾值的时间应不超过 150ns。

为了抑制电缆远端（远离检测器的电缆终端）开路情况下的脉冲反射，可在远端连接终端阻抗，其阻抗值应与电缆试样的特性阻抗值匹配。

如试验时无终端阻抗，为了避免脉冲叠加的影响，可采用反射抑制器，即一种电子开关，在大多数情况下能闭锁检测器的输入，隔断电缆远端开路情况下的反射脉冲，但是当局部放电的部位处于远端或其附近时则有些正叠加就难以避免。

常用试验线路见图 5.1-22。此外还有更复杂的线路，可用来确定放电点的近似部位等。

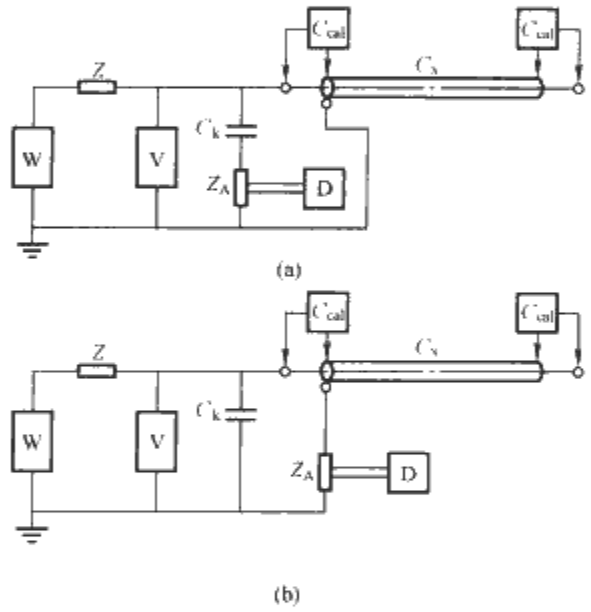


图 5.1-22 常用的两种局部放电试验回路

(a) 输入元件 Z_A 与耦合电容器 C_k 串联；

(b) 输入元件 Z_A 与电缆 C_X 串联

C_{cal}—校准电容器；C_k—耦合电容器；C_x—电缆试样；D—检测仪器；V—高压电压表；W—工频交流电源；Z—电感或滤波器；Z_A—测量阻抗

(3) 试样制备。型式试验应取短电缆试样，例行试验应在制造长度的电缆产品（长电缆试样）上进行。试验前应仔细制作试验用电缆终端，以避免因终端产生的局部放电。这些终端包括：油纸终端；预制式简易终端；氟里昂（F113）终端；油终端；油水终端；脱离子水终端。其中最常用的是脱离子水终端。

(4) 试验程序。试验回路应无放电，以达到所需灵敏度。校准不必在施加高压情况下进行。电压、灵敏度和允许局部放电量应根据不同型式电缆在标准中的要求确定。短电缆试验（包括型式试验）或长电缆试验均应满足产品要求的测试灵敏度。大部分情况下，背景噪声应低于 2pC。当确认背景噪声得到保证时，试样的试验结果可认为有效。施加电压过程和数值均按产品标准规定，因为当前局部放电测试仪器及其配套设备已达到很先进的水平，一般可准确地判定电缆质量。

5.2 冲击电压试验

(1) 试验电压。

1) 试验电压值：

雷电冲击电压试验的试验电压值一般是指冲击电压波的峰值。对于某些试验回路，在冲击电压波的峰值处可能会有振荡或过冲（对峰值附近的过冲或振荡，只有当其单个波峰的幅值不超过峰值的 5% 才是允许的）。如果这种振荡的频率不小于 0.5MHz 或过冲的持续时间不大于 1μs，应作平均曲线。测量时可取这条平均曲线的最大幅值作为试验电压的峰值。

操作冲击电压试验的试验电压值，除在有关产品标准中另有规定外，试验电压值是指预期峰值。

2) 试验电压波形：

雷电冲击电压波的视在波前时间 T_1 为 1～5μs，视在半波峰值时间 T_2 为 40～60μs，如图 5.1-23 所示。其标准规定值与实测值之间的偏差应不超过规定范围的±3%。

操作冲击电压波的波前时间 T_P 为 250μs，半峰值时间 T_2 为 2500μs，如图 5.1-24 所示。其标准规定值与实测值之间的容许偏差为±3%；波前时间为±20%；半峰值时间为±60%。

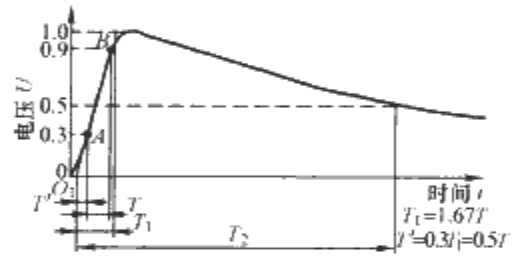


图 5.1-23 雷电冲击电压波

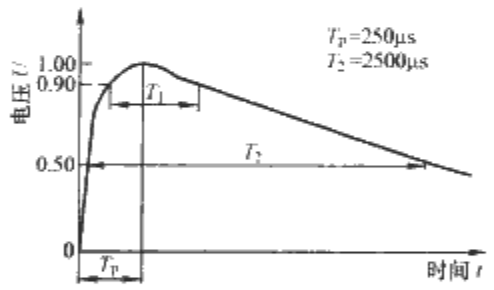


图 5.1-24 操作冲击电压波

(2) 试验设备。雷电冲击电压波一般由冲击电压发生器产生，冲击电压发生器主要由许多电容器组成，电容器先由直流电源并联充电，然后串联对包括试样在内的回路放电。操作冲击电压波通常由常规的冲击电压发生器产生，在选择产生操作冲击回路时，要避免由试样的非破坏性放电电流而引起冲击波形畸变过大，特别是高电压下作外绝缘的污秽试验时，这样的电流可能达到相当大的数值；如果试验回路的内阻抗相当高，可能引起波形严重畸变，甚至阻止破坏性放电发生。

试验电压的测量和冲击波形的确定，用 GB/T 16927.2 规定认可的测量装置测量试验电压峰值、各时间参量和振荡或过冲时，应采用经 GB/T 16927.2 规定程序认可的测量系统，包括：分压器、示波器和峰值电压表（记忆示波器、数字记录仪、数字存贮示波器）、高压引线、阻尼电阻、高频电缆及其端部匹配和接地回路，测量试验电压峰值和波形参数。测量应在试样接入回路的状态下进行，通常对每个试样都要校核冲击波形。但具有相同设计和相同尺寸的电缆试样，在同一个条件下作试验，只需校核一次。由试验回路参数计算确定冲击波形是不准确的，雷电冲击波测量系统的…

般要求是冲击波峰值的总不确定度为±3%范围内；测量冲击波形时间参数的总不确定度为±10%范围内；测量可能叠加在冲击波上的振荡应不超过规定的允许水平。操作冲击波测量系统的一般要求是操作冲击峰值的总不确定度为±3%范围内；测量操作冲击波形时间参数的总不确定度为±10%范围内。用认可的测量装置校准未认可的测量装置测量，这一方法通常是将与试验电压有关的某种仪器的显示（例如冲击电压发生器第一级的充电电压的显示）和对同一电压进行的测量之间建立一种关系。其电压的测量可以用符合 GB/T 311.6 的测量球隙进行。这个关系可能与试样和球隙的接入有关，因此在校准时和实际试验时其他条件应保证相同。在试验期间球隙距离应增至足够大以防止放电。对电缆试样进行试验时，通常可采用不低于 50%的试验电压外推，但只有试验电压与有关参数成正比时，才可以采用外推法。

（3）试样制备。应按有关产品标准的规定对电缆试样进行处理，如果仅对电缆附件进行冲击电压试验，则与电缆附件相配的电缆试样不必经受弯曲试验。除产品标准另有规定外，电缆试样长度按下述规定：

1）试样仅有两个电缆终端头，两终端头底部间电缆的长度至少为 5m。

2）试样中有一个电缆连接头，每个电缆终端头底部至连接头间自由电缆的长度至少为 5m。

3）试样中有一个以上电缆连接头，每个电缆终端头底部至连接头间自由电缆的长度至少为 5m，相邻连接头间自由电缆的长度至少为 3m。

试样应处于相应产品标准规定的试验压力（油压或气压）和试验温度条件。如果产品标准规定试样需要在导体加热条件下进行冲击电压试验，应采用将电缆试样穿过穿心式感应加热变压器，并在试样的两终端头之间利用电缆线芯或铜（铝）母线相连接，以便施加导体加热电流。试验温度和测温方法应符合产品标准规定。或者也可按供需双方协议采用其他的温度测量方法。如果因为实际原因不可能仅靠导体电流加热，可以在金属屏蔽和（或）金属套通过电流作附加加热，或采用保温层或外部加热措施。耐受水平的冲击电压试验电缆试样终端部分的长度和制作方法，应保证试验电压下不发生沿试样终端表面闪络放电或内部击穿。

（4）试验程序。试样的终端接至冲击电压发生器，测量系统与其并联。在此条件下，以试样所规定的耐受冲击电压值的 50%、65%和 80%分别校准冲击电压发生器输出电压值与相应的充电电压值，绘制两者之间的关系曲线。此曲线一般应为一直线，再利用外推法确定与试样所规定的耐受冲击电压值相对应的充电电压值，并以此充电电压值作为施加耐受冲击电压值的参考依据。利用冲击电压测量系统测量冲击电压值（也可利用测量球隙测量冲击电压值）和摄录冲击电压波形的示波图，示波图应包括时标和校幅。根据示波图判断冲击电压波形是否符合规定，如果不符合，应调节冲击电压发生器的波前和波尾电阻参数，重复校准。

除非产品标准另有规定，在试样处于相应产品标准规定的试验压力和温度条件下，连续施加 10 次正极性相应规定的耐受冲击电压值。如果所施加的耐受冲击电压值低于规定的容许偏差下限，该次不予计数。应适当调整充电电压值，并相应补充施加耐受冲击电压值。在施加 10 次正极性相应规定值的耐受冲击电压后，立即按规定进行负极性冲击电压值和波形的校准，然后在试样上连续施加 10 次负极性相同规定值的耐受冲击电压。同样，如果所施加的耐受冲击电压值低于规定的容许偏差下限，该次也不予计数，应适当调整充电电压值，并相应补充施加耐受冲击电压值。在连续施加正和负极性相应规定的耐受冲击电压值时，至少应分别摄录第 1 次和第 10 次冲击电压示波图。示波图应包括时标和校幅。

对电力电缆绝缘型护套和电缆附件试样进行试验时，试样的所有线芯都应与金属套（屏蔽）和铠装（若有）相连接，并接至冲击电压发生器输出端，而附加特殊电极（如水槽或石墨涂层）接至接地极。埋地绝缘接头的外护层冲击电压试验应按相关的产品标准规定进行。

5.3　介质损耗角正切试验

介质损耗角正切（tanδ）表征电缆绝缘在交流电场下能量损耗的一个参数，是外施正弦电压与通过试样的电流之间相角的余角正切。

（1）试验电压。

1）试验电源除了用试验变压器产生所需的试验电压外，也有用串联谐振回路产生试验电压。试验电源应满足相应试样试验所需的试验电压和电容电流的要求。试验电源应为频率 45～65Hz 的交流电压，电压的波形应接近正弦波，两个半波基本上相同，且峰值与有效值之比为 1.41±0.07。

2）标准电容器的额定工作电压应大于相应试样所需的最高测试电压，并满足下述条件：

① 电容量实际值准确度小于或等于±0.05%。

② $\tan\delta \leqslant 1\times10^{-5}$。

3）可采用西林电桥（或电流比较仪式电桥）和高压标准电容器测量电缆的介质损耗角正切（tan δ）。西林电桥（应为双屏蔽结构并附有屏蔽电位自动调节器）或电流比较仪式电桥，应满足：

① tanδ 测量范围 1×10^{-5}～1.0。

② tanδ 测量准确度 $\pm0.05\%\pm1\times10^{-4}$。测量仪器应满足试样的电容电流要求，应选择合适的配件，否则会影响测量精度，甚至损伤测量仪器。

（2）试样制备。应按产品标准规定选取试样的长度，但不得小于 4m（不包括电缆终端）。试样终端部分的长度和终端的制作方法，应能保证在规定的最高测试电压下不发生沿其表面闪络放电或内部击穿。为了提高测量的准确度，可在被测试样的端部开切保护环，非被测部分接地端接地。充油或充气电缆试样的油压或气压应符合产品标准规定。

试样测量极对地应具有一定的绝缘电阻值。交联聚乙烯绝缘电力电缆可采用脱离子水终端。终端制作（包括开保护环）应按其技术说明书的规定进行。

（3）试验程序。除产品标准中另有规定外，应按下列方式接线：

1）单芯电缆芯线导体接高压端，金属套或屏蔽接测量极。

2）分相铅套电缆依次将每一芯线导体接高压端，其他芯线相互连接并与金属套、屏蔽一起接至测量极。

3）多芯纸绝缘电力电缆依次将每一芯线导体接高压端，其他芯线导体相互连接并接至测量极；或每一芯线导体接高压极，其他芯线导体相互连接并与金属套、屏蔽一起接至测量极。

4）多芯交联聚乙烯绝缘电力电缆依次将每一芯线导体接高压端，其他芯线相互连接并与屏蔽一起接至测量极。

5）有铠装多芯电缆测试时应将铠装接至保护电极或接地。

除产品标准另有规定外，一般均在试验场的环境温度下

测量。试样的温度与周围环境温度之差不应超过±3℃。试验前应用温度计（准确度为±0.5℃）测量环境温度，温度计与试样的距离应不超过1m。按产品标准要求在规定的试验温度下测量 tanδ 值时允许采用各种方法测量试样温度，但测量值与标准规定值之差应不超过±3℃。

测量时应从较低值（不超过产品所规定的测试电压值的40%）开始将电压缓慢平稳地升至规定的试验电压值（电压偏差应不超过规定值的±3%），然后进行电桥平衡（检流计灵敏度应从最低值开始）。测量结束后，将检流计灵敏度调至最低值，并应迅速降压至低于所规定试验电压的40%，然后再切断电源。

（4）试验结果及计算。按试验所采用测量电桥的线路，直接读数或计算试样的 tanδ 值。

按试验所采用测量电桥的线路，直接读数或计算试样的电容值。

（5）注意事项。试验环境空气相对湿度应不超过85%。

测量前试样应先经过工频交流耐受电压试验（在试样上施加测量 tanδ 时所需的最高测试电压有效值，持续5min，试样不应有任何异常现象）。

高压标准电容器和试样与测量仪器之间的连接线，应采用满足测量仪器要求的相同规格和长度的屏蔽电缆。

5.4 交流电压试验

（1）试验电压。对试验电压的要求：电压波形应为频率45～65Hz的交流电源，通常称为工频试验电压。试验电压的波形为两个半波相同的近似正弦波，且峰值与有效值之比应为1.41±0.07，如满足这些要求，则认为高压试验结果不受波形畸变的影响。如果诸谐波的有效值不大于基波的方均根（有效）值的5%，则认为满足上述对电压波形的要求。在整个试验过程中，试验电压测量值的容许偏差应保持在规定电压值的±3%以内。容许偏差为规定值与实测值的差值。它与测量误差不同，测量误差是指测量值与真值之差。

（2）试验电压的产生。除了用试验变压器产生所需的试验电压外，根据电线电缆产品具有较大电容的特点，也可采用规定的串联谐振回路产生试验电压。不论采用哪一种方式，试验电源都应满足试样试验所需的电压和电容电流的要求。试验回路的电压应稳定，不受各种泄漏电流的影响。试样的非破坏性放电不应使试验电压有明显的降低，以至影响试样破坏性放电时的电压测量。串联谐振回路主要是由与容性试样或负载相串接的电感及相连的馈电电源所组成，通过改变回路参数或电源频率，就能够把回路调整到谐振，此时，加到试样上的电压远大于电源电压且大体上是正弦波。谐振条件和试验电压的稳定性取决于电源频率和试验回路特性的稳定性。当放电发生时，电源供给很小的电流，这就限制了对试样介质的破坏。

（3）试验电压的测量。用GB/T 16927.2规定的测量装置测量电压的峰值，方均根（有效）值和正弦波畸变及瞬态电压降的测量应采用经GB/T 16927.2规定程序认可的测量装置。一般要求是在额定频率下测量试验电压峰值或有效值的总不确定度应在±3%范围内。对于例行试验，应采用下述3种方法：

1）电压互感器（与试样的高压端并联）。电压互感器的测量误差应不超过±1%，与之相接的电压表的误差应不超过±2%。

2）高压静电电压表（与试样的高压端并联）。高压静电电压表的测量误差应不超过±2%。

3）分压器（与试样的高压端并联）。分压器的分压比误差应不超过±1%。

（4）试样制备。除产品标准中另有规定外，抽样试验用样品应随机抽样。试样的数量和长度应符合产品标准规定，试样终端部分的长度和终端头的制作方法应能保证在规定的试验电压下不发生沿其表面闪络放电或内部击穿。在水槽内进行试验时，试样的两个端部伸出水面的长度应不小于200mm，且应保证在规定的试验电压下不发生沿其表面闪络放电。充油或充气电缆试样的油压或气压应符合产品标准规定。交联聚乙烯绝缘电力电缆可采用脱离子水终端，应严格按技术说明书的规定制作终端。应采用特殊方法制备矿物绝缘电缆试样，以避免影响电缆端头的密封和破坏绝缘线芯的结构，导致试样击穿造成误判断。

（5）试验程序。试样耐压试验的试验电压值和耐受电压时间按产品标准规定，逐级击穿试验，应由制造厂和用户商定每级升压的数值和耐受时间。推荐每级升压至少 $0.25U_0$，耐受时间至少5min。

除产品标准中另有规定外，试样接线应按下列规定接线方式接线，但必须保证试样每一线芯与其相邻线芯之间至少经受一次按产品标准规定的工频电压试验。电线电缆应按表5.1-132规定接线。在试样的金属套（屏蔽）和铠装之间的内衬层试验时，所有线芯都应与金属套（屏蔽）相连接，并接至试验电源的高压端，而铠装接至接地端。5芯及以上多芯电缆，通常需进行二次试验：第一次在每层中的奇数芯（并联）对偶数芯（并联）之间施加电压；第二次在所有奇数层的线芯（并联）对偶数层的线芯（并联）之间施加电压。如果电缆中同一层中含有的线芯数为奇数，则应补充对未经受电压试验的相邻线芯间再进行一次规定的电压试验。

由多芯组成的每一屏蔽单元，其试验的接线方式与以上规定的原则相同，试验时屏蔽应接地。试验时，试样的温度与周围环境温度之差应不超过±3℃。

对试样施加电压时，应当从足够低的数值（不超过产品标准所规定试验电压值的40%）开始，以防止操作瞬变过程而引起的过电压影响；然后应缓慢地升高电压，以便能在仪表上准确读数，但也不能升得太慢，以免造成在接近试验电压时耐压时间过长；当施加电压超过75%试验电压后，只要以每秒2%的速率升压，一般可满足上述要求。试验电压应保持规定时间后，降低电压，直至低于所规定试验电压值的40%，然后切断电源，以免可能出现瞬变过程而导致故障或造成不正确的试验结果。

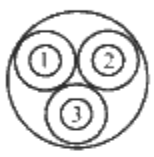
（6）试验结果及评定。试样在施加所规定的试验电压和持续时间内无任何击穿现象，则可认为该试样通过耐受工频电压试验。如果在试验过程中，试样的端部或终端发生沿其表面闪络放电或内部击穿，允许另做终端，并重复进行试验，除产品标准有特殊规定外，此时必须重新计时。

试验过程中因故停电后继续试验，除产品标准另有规定外，应重新计时。

试验中如发生异常现象，应判断是否属于“假击穿”。假击穿现象应予排除，并重新试验。只有当试样不可能再次耐受同样的试验电压时，才可认为试样已击穿。

（7）注意事项。试验回路应有快速保护装置，以保证当试样击穿或试样端部或终端发生表面闪络或内部击穿时，能迅速切断试验电源。试样与接地体或邻近物应有足够的距离，试区周围应有可靠的安全措施。试区内应有接地极，接地电阻应小于4Ω，试验装置、试样和附加电极均应与接地极可靠连接。

表 5.1-132　　电力电缆接线方式

试样芯数	试样结构简图	试样接线方式（高压端→接地端）	
		无金属套、金属屏蔽、铠装且无附加特殊电极	有金属套、金属屏蔽、铠装或有附加特殊电极
单　芯		—	1→0
2　芯		1→2	(1) 1→2+0 (2) 2→1+0
3　芯		(1) 1→2+3 (2) 2→3+1	(1) 1→2+3+0 (2) 2→1+3+0 (3) 3→1+2+0
4　芯		(1) 1→2+3+4 (2) 2→3+4+1 (3) 3→4+1+2	(1) 1→2+3+4+0 (2) 2→1+3+4+0 (3) 3→1+2+4+0 (4) 4→1+2+3+0

注　1. 表中“1，2，3，4”代表线芯导体。

2. 表中“0”代表金属护套，金属屏蔽，铠装或附加特殊电极（指水槽、金属珠链、石墨涂层、绕包金属箔等）。

3. 表中“+”代表相互电气连接。

5.5　直流电压试验

（1）试验设备。试验电压的电压波形：除在产品标准中另有规定外，试样上的试验电压应是纹波因数不大于 3%的直流电压。在湿试验和人工污秽试验时，要注意接入试样和试验条件可能影响纹波因数。容许偏差：当试验持续时间超过 60s 时，在试验过程中试验电压的测量值应保持在规定水平的±3%以内。

试验电压的产生一般均用直流高压发生器产生，直流高压发生器主要由调压器（或脉宽调制、变频装置等）、整流变压器、整流元件、滤波电容器、极性转换开关和放电电阻组成。也可用静电发生器产生直流高压。

电源的额定输出电流应使试样电容在相当短的时间内充电。但当试样电容很大时，也允许长达几分钟的充电时间。电源（包括储能电容）还应能供给泄漏电流和吸收电流，以及任何内部和外部的非破坏性放电电流，其电压降不应超过 10%。在进行电缆内绝缘试验时，这些电流通常很小，但进行电缆附件湿试时，泄漏电流可达数十毫安，有时会偶然遇到 10^{-2} 库伦级的预放电脉冲。

算术平均值、最大值、纹波因数和试验电压的瞬时压降通常采用按 GB/T 16927.2 规定程序认可的测量装置测量。在测量纹波，瞬态电压或电压稳定性时，测量装置的响应特性应符合要求。一般要求测量试验电压算术平均值的测量总不确定度应不超过±3%。目前通常采用电阻分压器：分压器的分压比误差应不超过±1%，分压器测量电流在额定电压下应大于 0.5mA，分压器的低压臂经测量同轴电缆接至误差不超过±0.5%的低压读出仪器。电压的测量也可以采用符合 GB/T 311.6 的球隙进行的测量。这种校准关系可能与试样、球隙或棒－棒间隙的接入、湿试验中的雨量等因数有关。因此，在校准和实际试验过程中，这些条件应保持相同，为防止火花放电，球隙间隙的距离应拉开足够大。应注意将供电电压与输出电压之间的关系用于测量可能不够可靠。用球隙测量直流电压时，由于纤维会引起较低电压下的放电，因此必须采取预防措施。应施加多次电压并以最高电压值作为实际测量值。

（2）试样制备。试样的数量和长度应符合产品标准规定。充油或充气电缆试样的油压或气压应符合产品标准规定，试样温度也应符合相应产品标准的规定。

（3）试验程序。试验的电压值、极性、电流值和耐受电压时间按产品标准规定。逐级击穿试验，应由制造厂与用户商定每级升压的数值和耐受时间。

接线方法除产品标准另有规定外，按下列规定接线方式接线，但必须保证试样每一线芯与其相邻线芯之间，至少经受一次产品规定的直流电压试验。电线电缆产品的接线方式见表 5.1-132。单芯电缆的导体应接高压端，金属套或屏蔽或接地。多芯电缆应依次将每一导体接高压端，其他导体相互连接并与金属套、屏蔽或铠装（如果有的话）一起接地。分相铅包（或铝包）电缆应依次将每一导体接高压端，其他导体相互连接并与金属套、屏蔽或铠装（如果有的话）一起接地。对试样的金属套（屏蔽）与铠装之间的内衬层进行试验时，所有线芯都应与金属套（屏蔽）相连接，并接至试验电源的高压端，而铠装接至接地端。在绝缘型护套试验时，试样的所有导体都应与金属套（屏蔽）和铠装（若有）相连接，并接至高压端的负极，而附加特殊电极（如水槽或石墨

涂层）接至接地端。

除产品标准另有规定外，试验应在试验场地的环境温度下进行，试样的温度与环境温度相差应不超过±3℃。

对试样施加电压时应从足够低的数值（不应超过相应产品标准所规定的试验电压值的 40%）开始，以防止操作瞬变过程引起的过电压影响；然后应慢慢地升高电压，以便能在仪表上准确读数，但也不应太慢，以免造成在接近试验电压时耐压时间过长。若试验电压值达到 75%以上，以每秒 2%的试验电压速率升压，通常能满足上述要求。将试验电压保持规定时间后，然后切断充电电源，通过适当电阻由滤波电容器和试样放电来降低电压。

（4）试验结果的评定。试样在施加相应规定的试验电压和持续时间内无任何闪络放电，或者试验回路电流不随时间而增大，则应认为试样通过直流电压试验。如果在试验期间内出现电流急剧增加，甚至直流高电压发生器线路的开关跳闸，且试样不可能再次耐受所规定的试验电压，则应认为试样已击穿。在对试样施加规定的试验电压下，其泄漏电流不超过相应标准规定值，则应认为试样的泄漏电流试验合格。

（5）注意事项。直流高压发生器应有快速过电流保护装置，以保证当试样击穿或试样端部或终端头发生沿其表面闪络放电或内部击穿时能迅速切除试验电源。试验区周围应有金属接地栅栏、进出口门连锁、信号指示灯和“高压危险”警告牌等安全措施。试验区内应有接地极，接地电阻应小于 4Ω，直流高压发生器的接地端和试样的接地端均应与接地极可靠连接。

直流高压端（包括直流高压发生器、测量装置和试样）与周围接地体之间应保持足够的安全距离，以防发生空气放电。与直流高压端（包括直流高压发生器、测量装置和试样）邻近的易感应电荷的设备均应可靠接地。对电线电缆试样的直流耐压试验应于该试样的绝缘电阻测量后实施。试验结束后，必须对试样接地，以充分放电。

5.6 绝缘电阻试验

（1）绝缘电阻测量。绝缘电阻规定有二种测量方法，一种是直流比较法，测量范围为 $10^5\,\Omega\sim2\times10^{15}\,\Omega$，以前常用检流计等仪表和其他元件连接而成，目前已很少采用。另一种是电压电流法，测量范围为 $10^4\,\Omega\sim10^{16}\,\Omega$，这是一台完整的仪器，电阻值可直接读数，也可称之为“高阻计法”，是最常用的方法。近来也发展了直流比较法原理的整套仪器，不需装配即可直接测量。

（2）试验设备。

1）直流比较法典型的测试系统接线原理见图 5.1-25，主要组成部分应符合下列要求：

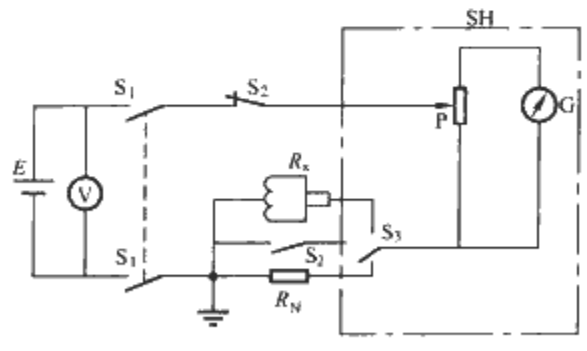


图 5.1-25 直流比较法测试系统接线原理图

E—直流电源；G—检流计；P—分流器；R_N—标准电阻；R_x—试样绝缘电阻；SH—金属极屏蔽（虚线）；S_1—直流电压开关；S_2—试样短路开关；S_3—换向开关；V—直流电压表

①检流计的电流常数应不大于 10^{-9} A/mm。

②分流器的分流系数应能在 1/10 000～1/1 的范围内调节，且可调级数不少于 5 级，临界电阻应等于或略大于检流计的外部临界电阻，但不超过 20%。

③标准电阻的阻值应不小于 $10^5\,\Omega$，相对误差应不超过±0.5%。

④直流电源的输出电压应稳定，输出端电压变化应不超过±1%。

⑤检流计、分流器、标准电阻、测量连接线和线路元件的底座均应与屏蔽相连，被屏蔽元件与屏蔽间的绝缘电阻应比标准电阻至少大 100 倍。

⑥用电池作检流计的照明电源时，该电源必须置于屏蔽系统内。如用交流电源供电，必须将降压变压器低压侧的一端与屏蔽相连接。

2）电压—电流法典型的测试系统接线原理见图 5.1-26，主要组成部分应符合下列要求：

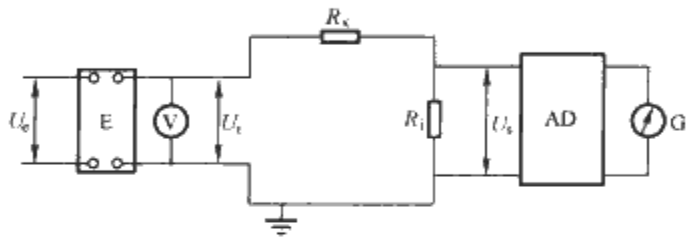


图 5.1-26 电压—电流法（高阻计法）测试系统接线原理图

AD—高阻抗直流放大器；E—直流电源；G—检流计或微安表；R_i—直流放大器输入电阻；R_x—试样绝缘电阻；U_e—交流输入电源电压；U_t—直流输出电压；U_s—放大器输入电阻压降；V—直流电压表

a. 直流电压表的精度应不低于 1.0 级。

b. 高阻抗直流放大器、检流计或微安计在额定工作电压下 8h 内零点漂移应不超过仪表刻度标尺全长的 4%。

c. 直流放大器输入电阻的阻值应比试样绝缘电阻至少小 100 倍。

d. 采用整流直流电源时电压必须稳定。因电源电压波动所引起的（对试样的任何充电和放电）电流与测量绝缘电阻时的泄漏电流相比，应小至可以忽略不计。同时输出电压的纹波因数应不大于 0.1%。连接线应有良好的屏蔽，其对地绝缘电阻比放大器输入电阻应至少大 100 倍。

（3）试样制备及安置。除产品标准中另有规定者外，试样有效长度应不小于 10m，应小心地剥除试样两端绝缘外的覆盖物，并注意不损伤绝缘表面。试样应在试验环境中放置足够长的时间，使试样温度和试验温度平衡，并保持稳定。浸入水中试验时，试样两个端头露出水面的长度应不小于 250mm，绝缘部分露出的长度应不小于 150mm。在空气中试验时，试样端部绝缘部分露出的长度应不小于 100mm。露出的绝缘表面应保持干燥和洁净。

（4）试验程序。

1）有金属护套、屏蔽层或铠装的电缆试样测试接线方式为：单芯电缆应测量导体对金属套或屏蔽层或铠装层之间的绝缘电阻；多芯电缆应分别就每个导体对其余线芯与金属套或屏蔽层或铠装层连接进行测量。

2）非金属护套、非屏蔽或无铠装的电缆试样测试接线方式为：单芯电缆应浸入水中，测量导体对水之间的绝缘电阻；多芯电缆应分别就每个导体对其余线芯进行测量。也可将试样紧密地绕在金属试棒上，单芯电缆测量导体对试棒之间的绝缘电阻；多芯电缆测量每个导体对其余线芯与试棒连接的

绝缘电阻。试棒外径按产品标准规定。

以上接入测试系统的有效试样长度，其测量误差应不超过±1%。

测试电压一般为 100～1000V。

(5) 试验环境条件。除电线电缆产品标准中另有规定外，型式试验或抽样试验时测试应在环境温度为 20℃±5℃和空气相对湿度不大于 80%的室内或水中进行。例行试验一般在环境温度为 0～35℃的室内进行。

工作温度下绝缘电阻的试验温度应在有关产品标准中规定，温度的误差应不超过±2℃。有争议时环境温度或工作温度的误差应不超过±1℃。

绝缘线芯或单芯电缆的高温下绝缘电阻可按 GB 5013.2—2008 中 2.4 规定的方法测试，或从成品电缆上取 3～5m 电缆，将试样作适合于绝缘电阻测量的处理后，放入试验箱中。在达到规定试验温度后，保温 2h，测量线芯绝缘电阻。

除产品标准有规定外，测试电压一般取 100～1000V。

除非另有规定，为了使绝缘电阻测量值基本稳定，测试充电时间不少于 1min，但不超过 5min。

测试系统的测量误差应符合下述要求：被测试样绝缘电阻值为$(1\times10^{10})\Omega$及以下，测量误差不超过±10%；被测试样绝缘电阻值为$(1\times10^{10})\Omega$以上，测量误差不超过±20%。

(6) 试验结果及计算。采用直流比较法测试时应按仪器说明书操作和计算绝缘电阻值。

采用电压—电流法或用其他仪器测试时，应按仪器说明书操作并直接读取绝缘电阻值。每千米长度的绝缘电阻应按以下公式计算：

$$R_L = R_x L \tag{5.1-2}$$

式中：R_L为每千米长度绝缘电阻，MΩ·km；R_x为试样绝缘电阻，MΩ；L为试样有效测量长度，km。

(7) 注意事项。试验需要时，可在试样两端绝缘表面上加保护环。保护环应紧贴绝缘表面，并与测试系统的屏蔽相连接。

如试样的绝缘电阻大于$1\times10^{12}\Omega$和测量时因外界电磁场或试样运动产生的摩擦会引起测试不稳定时，可将试样静置在整体屏蔽的条件下进行测试，但测试回路的对地绝缘电阻比放大器的输入电阻至少大 100 倍，屏蔽必须可靠接地。

重复试验时，在加电压之前应使试样短路放电，放电时间应不少于试样充电时间的 4 倍；如因试样有剩余电荷而造成测量结果有明显差别时，必须先进行充分放电。对于这类试样，无论是第一次测试或重复测试，均需充分放电。

采用输出端对地悬浮的高阻计测量绝缘电阻时，推荐将高阻计的测量端(低压端)与被测绝缘线芯的导体相连，高阻计的高压端连接试样的另一极接地；当采用通用的高阻计测量绝缘电阻时，试样必须对地绝缘，否则可能使高阻计因输出的高压端对地短路而损坏，或由于加热电源的干扰，可能影响测试的准确性。

另有一些规范性附录内容可查阅 GB/T 3408.5 标准。

5.7　表面电阻试验

(1) 试验设备。试验箱为透明的玻璃或有机玻璃器皿，如图 5.1-27 所示，箱体的尺寸应能保证试样不与箱体的任何一面相碰，箱盖和箱体应很好地密闭，以使空气的互换量最小，引接线应采用高绝缘电阻电线(如聚四氟乙烯绝缘电线)。无试样时，在规定的温度和相对湿度下，两引出线间的电阻至少比试样的表面电阻大 100 倍。箱内的$Na_2Cr_2O_7$饱和水溶液是为使试验箱在 20℃的环境中时，箱内的相对湿度能保持在 50%±5%。

如试验箱同时放入几个试样，试样间的距离应不小于 25mm。试验箱内有一湿度计，可以从试验箱的外面得到箱内的相对湿度值。

采用直流比较法或电压—电流法的测试系统要求，与 1.5.6 绝缘电阻测量相同。

(2) 测量方法。表面电阻的测试可以采用直流比较法，也可以采用电压—电流法(高阻计法)。无论采用何种方法，试验设备和测量误差均应符合 GB/T 3048.5 的规定。只要测试的精度符合要求，也可采用其他测试仪器。

(3) 试样制备。从被试电线电缆上切取 3 根外观完整、表面无缺损的试样，试样的长度应不小于 250mm。用干净不落屑、柔软、干燥、吸水的材料来回擦拭试样几次作清洁处理，对沾染严重的试样，可用酒精擦拭，再做干燥处理。用直径不大于 0.05mm 的镀银圆铜线在试样的中部，以螺旋状缠绕形成两个电极，两电极的内侧相距 50mm ±1mm，每一电极的密绕圈数不得少于 10 圈。也可以采用宽度为 10mm 的清洁自粘性铜箔在试样上叠绕数圈，再用直径为 0.2～0.5mm 的圆铜线缠绕在铜箔上形成电极。用干净不落屑、柔软、干燥、吸水的材料来回擦拭试样的电极之间部分，作此清洁处理后，试样的电极之间部分应不再接触除环境空气外的其他任何物质。

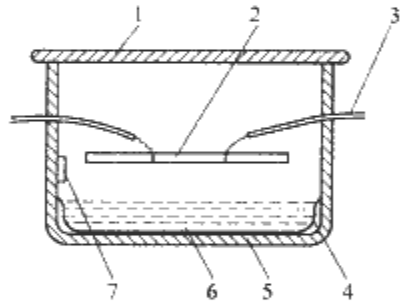


图 5.1-27　表面电阻试验箱示意图

1—箱盖；2—试样；3—引接线；4—搪瓷皿；5—箱体；6—$Na_2Cr_2O_7$饱和水溶液或其他水溶液；7—湿度计

(4) 试验程序。将试样放入试验箱中，试样的两电极与引接线箱内端相连。试样应按产品标准规定进行环境条件化处理。如未作规定，则可将试验箱置于 20℃±2℃的环境下，箱内的相对湿度应为 50%±5%，试样在此条件下至少放置 24h，作环境条件化处理。(在 20℃时，$Na_2Cr_2O_7$饱和水溶液的上方，相对湿度可保持为 52%，也可以用其他物质的水溶液，如一定密度的甘油水溶液)。

将引接线的箱外端与测量系统相接，测出试样电极中间部分的电阻值，测试用电压为 500V。除在产品标准中另有规定外，测试充电时间应足够充分，不少于 1min，但不超过 5min。除产品标准中另有规定，测量时试样应在环境条件化处理完全相同的状态下进行。

(5) 试验结果与计算。以测得的 3 个试样表面电阻测量值的中间值为试验结果。试样的表面电阻率为

$$\rho_s = R \cdot \pi \cdot D/L \tag{5.1-3}$$

式中：ρ_s为表面电阻率，Ω；R为表面电阻，Ω；D为试样的直径，mm；L为两电极内侧之间的距离，mm。

电压—电流法典型的测试系统接线原理如图 5.1-26 所示，主要组成部分应符合下列要求：

直流电压表的精度应不低于 1.0 级。

高阻抗直流放大器、检流计或微安计在额定工作电压下 8h 内零点漂移应不超过仪表刻度标尺全长的 4%。

直流放大器输入电阻的阻值应比试样绝缘电阻至少小 100 倍。

采用整流直流电源时电压必须稳定。因电源电压波动所引起的对试样的任何充电和放电电流，与测量绝缘电阻时的泄漏电流相比，应小至可以忽略不计，同时输出电压的纹波因数应不大于 0.1%。连接线应有良好的屏蔽，其对地绝缘电阻比放大器输入电阻应至少大 100 倍。

第2章　架空绝缘电缆

架空绝缘电缆是介于电力电缆和架空裸线的中间产品，是属于半绝缘性质的电缆，架设在电线杆的绝缘子上，仍由空气承担主要绝缘，运行条件与架空裸线有些相似，但架空绝缘电缆若相互接触时，不会造成短路，所以电缆架设间距比裸线小，节省了有效空间。尽管这类产品内容较少，但不宜归纳为电力电缆，更不宜归纳为裸线，为此单独编成一章。早在 80 多年前，中国城市的街道上和里弄内，就有不少 220/380V（或 110/190V）系统的架空绝缘电线，当时是将皮线固定在电线杆的白料上，或固定在嵌入墙内角铁的白料上．白料的间距也就是电线之间的绝缘距离。当时的皮线也就是铜芯橡皮绝缘棉纱编织浸涂沥青电线，白料也就是白色瓷绝缘子。皮线的使用寿命很短。几年后棉纱脱落，橡皮开裂，最终变成裸线，安全性很差。这可算是架空绝缘电缆的前身。

我国最常用架空绝缘电缆的电压等级为 10kV 和 1kV。20 世纪 90 年代，城市电网建设曾大量采用架空绝缘电缆，由于 10kV 交联聚乙烯绝缘架空电缆可采用多种交联方法制造，如化学交联、硅烷交联和辐照交联等，因此很快形成了几万公里的年产能力，迅速达到市场饱和。进入 21 世纪后，考虑城市环境美化，逐步用埋地电缆取代架空绝缘电缆。不过在林区使用架空裸线时，有些偶然因素容易引起裸线短路，甚至引发森林火灾，因此采用架空绝缘电缆是必要的。

架空绝缘电缆的载流量并不一定取决于其绝缘的工作温度，而是首先取决于导体在架空敷设条件下的工作温度，其次是绝缘材料工作温度的匹配，实际上线路设计还考虑经济电流密度和电压降等。由参考文献［1］知，铝绞线的长期使用温度应不超过 80℃，所以硬铝线绞合导体交联聚乙烯绝缘架空绝缘电缆，其导体工作温度仍为 80℃。若绝缘材料的允许工作温度低于导体的工作温度，如聚氯乙烯，则电缆工作温度应为 70℃。好在铝绞线的载流量计算时，导体温度取 70℃、80℃和 90℃ 3 档，总的看来，温度匹配还比较接近。从传热理论上说，架空绝缘电缆的载流量可略大于裸线的载流量，而实际上由于日照和风速等复杂的原因，通常在线路设计时，二者所取载流量相同。

1　架空绝缘电缆的基本结构及其材料

架空绝缘电缆的结构比较简单，低压架空绝缘电缆主要包括导体和绝缘。10kV 单芯架空绝缘电缆主要包括导体、导体屏蔽和绝缘。10kV 多芯电缆和 35kV 电缆需有绝缘屏蔽，但国内基本不生产这两系列产品。

1.1　导体

架空绝缘电缆的导体结构自成系列，不允许用单线，绞线结构主要采用 GB/T 3956—1997《电缆的导体》标准中第 2 种紧压绞合圆形导体，以减小成品外径，但是导体的过度紧压，特别是分层紧压，将影响导体的弯曲性能，有发生导体整体断裂的可能性。导体材料需根据架空绝缘电缆的敷设条件而选用，当电杆间隔距离较大时，导体的力学性能是主要因素，电缆必须符合线路的张力、自重、弧垂和振动等设计要求，同时应满足电导率的要求，常用的有硬铝绞线、铝合金绞线。钢芯铝绞线虽然未列入现行产品标准，实际上也有生产，并投入使用。对于线路导体跨距较小，力学性能则不是主要关键，若要求电导率高，可选用硬铜或软铜绞线。

参考 GB 3953—1989《电工圆铜线》标准，铜单线分 TR 型软铜单线、TY 型硬铜单线和 TYT 型特硬铜单线。铜单线的电气、力学性能和物理常数见表 5.2-1。参考 GB 3955—1983《电工圆铝线》标准和 GB/T 17048《架空绞线用硬圆铝线》标准，LR 型软铝线、LY4 型和 LY6 型硬铝线的电气、力学性能和物理常数见表 5.2-2。LY9 是现有产品标准规定采用的单线，其计算用数值和性能见表 5.2-3，抗拉强度最小值见表 5.2-4。做卷绕性能试验时，以不超过 60r/min 的速度在直径与硬铝线直径相等的芯轴上卷绕 8 圈，然后退绕 6 圈，再重新紧密卷绕，硬铝线不应断裂。参考 JB/T 8134—1997《架空绞线用铝—镁—硅系合金圆线》标准，铝合金线的计算用数值和性能见表 5.2-5。抗拉强度最小值及 250mm 标距的断裂伸长率见表 5.2-6。

表 5.2-1　铜单线电气、力学性能和物理常数

型号	直径范围 (mm)	密度 (kg/dm^3) (20℃时)	抗拉强度 (MPa)	线膨胀系数 ($\times10^{-6}℃^{-1}$)	电阻率 ($n\Omega\cdot m$) (20℃时)	电阻温度系数 ($℃^{-1}$)
TR	0.02～14.0	8.89	245～289	17.0	17.241	0.003 93
TY	0.02～14.0		271～421		17.77～17.96	0.003 77
TYT	1.50～5.00		408～446		17.77～17.96	0.003 81

表 5.2-2　铝单线电气、力学性能和物理常数

型号	直径范围 (mm)	密度 (kg/dm^3) (20℃时)	抗拉强度 (MPa)	线膨胀系数 ($\times10^{-6}℃^{-1}$)	电阻率 ($n\Omega\cdot m$) (20℃时)	电阻温度系数 ($℃^{-1}$)
LR	0.30～10.00	2.703	最大 95	23.0	28.00	0.004 07
LY4	0.30～6.00		95～125		28.264	0.004 03
LY6	0.30～10.00		125～165		28.264	0.004 03

表 5.2-3　LY9 型硬铝线计算用数值和性能

型号	直径公差 (mm)	密度 (kg/dm^3) (20℃时)	线膨胀系数 ($\times10^{-6}℃^{-1}$)	电阻率 ($n\Omega\cdot m$) (20℃时)	电阻温度系数 ($℃^{-1}$)
LY9	$d\leqslant3.00$ 为 ±0.03 $d>3.00$ 为 ±1%d	2.703	23.0	最大 28.264	0.004 03

表 5.2-4　LY9 型硬铝线抗拉强度最小值

标称直径 d (mm)	抗拉强度最小值 (MPa)	标称直径 d (mm)	抗拉强度最小值 (MPa)
$d\leqslant1.25$	200	$2.25<d\leqslant2.50$	175
$1.25<d\leqslant1.50$	195	$2.50<d\leqslant3.00$	170
$1.50<d\leqslant1.75$	190	$3.00<d\leqslant350$	165
$1.75<d\leqslant2.00$	185	$350<d\leqslant5.00$	160
$2.00<d\leqslant2.25$	180	—	—

表 5.2-5 铝—镁—硅合金线计算用数值和性能

型 号	电阻率 (nΩ·m) (20℃时)	电阻温度系数 (℃⁻¹)	密 度 (kg/dm³) (20℃时)	线膨胀系数 (×10⁻⁶℃⁻¹)	直径公差 (mm)
LHA1	最大 32.840	0.003 6	2.703	23.0	$d\leqslant 3.00$ 为 ±0.03 $d>3.00$ 为 ±1%d
LHA2	最大 32.530				

表 5.2-6 铝—镁—硅合金线抗拉强度和断裂伸长率最小值

标称直径 d (mm)	LHA1 型		LHA2 型	
	抗拉强度最小值 (MPa)	断裂伸长率最小值 (%)	抗拉强度最小值 (MPa)	断裂伸长率最小值 (%)
$d\leqslant 3.5$	325	3.0	295	3.5
$d>3.5$	315	3.0	295	3.5

1.2 绝缘

架空绝缘电缆的绝缘料是专用的，要求具有优良的耐候性能、力学和物理性能和必要的电气性能。黑色聚氯乙烯和黑色聚乙烯均可使用，但用量最多的是黑色交联聚乙烯。采用黑色料的目的是有效抗紫外线老化。JB/T 10260—2001《架空绝缘电缆用黑色可交联聚乙烯绝缘料》标准适用 10kV 及以下架空电缆绝缘料，是以低密度聚乙烯为基料或掺有聚乙烯共聚物的过氧化物交联聚乙烯、硅烷交联聚乙烯和辐照交联聚乙烯绝缘料。该标准统一规定了 3 种料的性能，见表 5.2-7，并规定了 3 种料的试样制备方法：化学可交联料的试样用模压法成型后，即可在模子内高温高压条件下交联；辐照可交联料的试样用模压法成型后，需在辐照条件下交联；硅烷交联的试片用挤压成型后，需在温水条件下交联。试片的技术指标与从电缆成品上剥取的试片有所差异。35kV 架空电缆用本色的化学可交联料。

表 5.2-7 黑色可交联聚乙烯绝缘料性能指标

序号	试 验 项 目	单 位	技术指标
1	原始力学性能		
	抗张强度：最小中间值	MPa	13.0
	断裂伸长率：最小中间值	%	300
2	空气烘箱老化后力学性能		
	老化条件：温度	℃	135±2
	时间	h	7×24
	抗张强度：最大变化率	%	±20
	断裂伸长率：最大变化率	%	±20
3	热延伸试验		
	试验条件：温度	℃	200±3
	负荷时间	min	15
	机械压力	MPa	0.20
	试验结果：载荷下最大伸长率	%	80
	冷却后最大永久变形	%	5
4	20℃体积电阻率 最小值	Ω·m	5×10^{13}
5	介电强度 最小值	MV/m	22
6	介质损耗因数 最大值		0.001①
7	耐环境应力开裂 F_{50} 最小值	h	1000
8	脆化温度	℃	−76
9	耐工人气候老化试验		
	老化 42 天后：抗张强度最大变化率	%	±30
	断裂伸长率最大变化率	%	±30
	老化 42 天与 21 天比较：抗张强度最大变化率	%	±15
	断裂伸长率最大变化率	%	±15

① 1kV 电缆用黑色可交联聚乙烯绝缘料不考核。

1.3 导体屏蔽半导电料

导体屏蔽半导电料可选用交联型或热塑型，其性能要求见表 5.2-8。

表 5.2-8 导体屏蔽半导电料性能要求

序号	项 目	单 位	导体屏蔽半导电料	
			热塑型	可交联型
1	老化前抗张强度：最小中间值	MPa	15	15
	老化前断裂伸长率：最小中间值	%	300	200
2	烘箱老化后力学性能：老化温度	℃	100±2	135±2
	老化时间	h	240	168
	断裂伸长率：最小中间值	%	100	100
3	热延伸试验：试验温度	℃		200±3
	负荷时间	min		15
	机械应力	MPa	—	0.20
	试验结果：载荷下最大伸长率	%		175
	冷却后最大永久变形	%		15
4	脆化温度	℃	−45	−50
5	体积电阻率：23℃时	Ω·cm	100	100
	90℃时	Ω·cm	500	500

2 架空绝缘电缆技术要求

架空绝缘电缆按 GB 12527—1990《额定电压 1kV 及以下架空绝缘电缆》标准和 GB 14049—1993《额定电压 10kV、35kV 架空绝缘电缆》标准生产，但 10kV 多芯架空绝缘电缆和 35kV 架空绝缘电缆基本上没有推广。此外有些工厂按企业标准生产其他结构架空绝缘电缆，结合地域市场推广。

2.1 1kV 架空绝缘电缆

(1) 一般规定。电缆的型号、名称和用途见表 5.2-9，规格见表 5.2-10。其使用特性如下：

1) 电缆的额定电压为交流 0.6/1kV，系统的工作电压应不大于系统额定电压的 1.1 倍。当使用在直流系统时，系统的额定电压应不大于电缆额定电压的 1.5 倍。

2) 聚氯乙烯和聚乙烯绝缘的工作温度不超过 70℃。交联聚乙烯绝缘的工作温度不超过 90℃，导体工作温度由线路设计者规定。

3) 电缆的敷设温度应不低于−20℃。

4) 电缆的允许弯曲半径，对于电缆外径小于 25mm 者应不小于 4 倍电缆外径，对于电缆外径为 25mm 及以上者应不小于 6 倍电缆外径。

表 5.2-9 1kV 架空绝缘电缆的型号、名称和用途

型 号	产 品 名 称	主要用途
JKV—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铜芯聚氯乙烯绝缘架空电缆	架空固定敷设，引户线等
JKLV—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铝芯聚氯乙烯绝缘架空电缆	
JKLHV—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铝合金芯聚氯乙烯绝缘架空电缆	
JKY—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铜芯聚乙烯绝缘架空电缆	
JKLY—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铝芯聚乙烯绝缘架空电缆	
JKLHY—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铝合金芯聚乙烯绝缘架空电缆	
JKYJ—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铜芯交联聚乙烯绝缘架空电缆	
JKLYJ—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铝芯交联聚乙烯绝缘架空电缆	
JKLHYJ—0.6/1	额定电压 0.6/1kV 铝合金芯交联聚乙烯绝缘架空电缆	

表 5.2-10　　1kV 架空绝缘电缆的规格

型　　号	芯 数	导体标称截面（mm²）
JKV,JKLV,JKLHV,JKY,JKLY,JKLHY,JKYJ,JKLYJ,JKLHYJ	1	16～240
	2,4	10～120
JK LV,JKLY,JKLYJ	3+K	10～120

注　K 为带有承载的中心导体，根据配电工程要求，适当选其截面与主芯截面搭配。

（2）主要技术要求。铜导电线芯应采用符合 GB 3953 中的 TY 型圆铜线，多芯电缆的铜导电线芯允许采用 TR 型软圆铜线。铝导电线芯应采用符合 GB 3955 或 GB/T 17048 中的 LY9 型硬圆铝线。铝合金导电线芯应采用符合 GB 7893 的 LHA 型或 LHB 型铝合金圆线。导体应采用紧压圆形绞合铜、铝或铝合金导线，导体绞合时的节距比、绞向应符合 GB3957 的规定。导体中的单线在 7 根及以下均不允许有接头，7 根以上的绞线中单线允许有接头，但成品绞线上两接头间的距离应不小于 15m。导体表面应光洁、无油污、无损伤绝缘的毛刺、锐边以及凸起或断裂的单线。导体结构和直流电阻应符合表 5.2-11 的规定。电缆结构尺寸、绝缘电阻和抗拉力应符合表 5.2-12 的规定。电缆绝缘的非电气性能应符合表 5.2-13 的规定。单线直径不进行考核。两芯及以上电缆的绝缘线芯应按 A、B、C 顺向相序绞合成束，绞合方向为右向，绞合节距不大于绝缘线芯计算绞合外径的 25 倍。

成品电缆应能经受 3500V、1min 电压试验。成品电缆应进行耐磨性能试验，耐磨次数应不少于 20 000 次。进行耐磨试验时电缆悬挂的负荷：对于导体标称截面 16mm² 及以上的为 50N，对于导体标称截面 16mm² 以下的为 30N。此外聚氯乙烯绝缘电缆，需要通过单根垂直燃烧试验。

表 5.2-11　　1kV 架空绝缘电缆导体结构和直流电阻

标称截面（mm²）	导体中单线最少根数		20℃时导体最大电阻（Ω/km）			
	铜	铝	硬铜	软铜	铝	铝合金
10	6	6	1.906	1.83	3.08	3.574
16	6	6	1.198	1.15	1.91	2.217
25	6	6	0.749	0.727	1.20	1.393
35	6	6	0.540	0.524	0.868	1.007
50	6	6	0.399	0.387	0.641	0.744
70	12	12	0.276	0.268	0.443	0.514
95	15	15	0.199	0.193	0.320	0.371
120	18	15	0.158	0.153	0.253	0.294
150	18	15	0.128	—	0.206	0.239
185	30	30	0.102	—	0.164	0.190
240	34	30	0.077 7	—	0.125	0.145

表 5.2-12　　电缆尺寸、绝缘电阻和抗拉力

导体标称截面（mm²）	导体外径（参考值）（mm）	绝缘标称厚度（mm）	单芯电缆平均外径上限（mm）	额定工作温度时最小绝缘电阻（MΩ·km）		电缆拉断力（N）		
				70℃	90℃	硬铜芯	硬铝芯	铝合金芯
10	3.8	1.0	6.5	0.006 7	0.67	3471	1650	2514
16	4.8	1.2	8.0	0.006 5	0.65	5486	2517	4022
25	6.0	1.2	9.4	0.005 4	0.54	8465	3762	6284
35	7.0	1.4	11.0	0.005 4	0.54	11 731	5177	8800
50	8.4	1.4	12.3	0.004 6	0.46	16 502	7011	12 569
70	10.0	1.4	14.1	0.004 0	0.40	23 461	10 354	17 596
95	11.6	1.6	16.5	0.003 9	0.39	31 759	13 727	23 880
120	13.0	1.6	18.1	0.003 5	0.35	39 911	17 339	30 164
150	14.6	1.8	20.2	0.003 5	0.35	49 505	21 033	37 706
185	16.2	2.0	22.5	0.003 5	0.35	61 846	26 732	46 503
240	18.4	2.2	25.6	0.003 4	0.34	79 823	34 679	60 329

表 5.2-13　　电缆绝缘非电性试验要求

序　号	试 验 项 目	单　位	聚氯乙烯	聚 乙 烯	交联聚乙烯
1	原始力学性能				
	抗张强度：最小中间值	MPa	12.5	10.0	12.5
	断裂伸长率：最小中间值	%	150	300	200
2	空气烘箱老化后力学性能				
	老化条件：温度	℃	80±2	100±2	135±2
	时间	h	168	240	168
	抗张强度：最小中间值	MPa	12.5	—	—
	最大变化率	%	±20	—	±25
	断裂伸长率：最小中间值	%	150	300	—
	最大变化率	%	±20	—	±25
3	人工气候老化试验				
	老化时间	h	1008	1008	1008
	0～1008 抗张强度最大变化率	%	±30	±30	±30
	断裂伸长率最大变化率	%	±30	±30	±30
	504～1008 抗张强度最大变化率	%	±15	±15	±15
	断裂伸长率最大变化率	%	±15	±15	±15
4	失重试验				
	老化条件：温度	℃	80±2	—	—
	时间	h	168		
	失重：最大值	mg/cm²	2.0		
5	抗开裂试验				
	试验条件：温度	℃	150±2	—	—
	时间	h	1	—	—
	试验结果		不开裂		
6	高温压力试验				
	试验条件：压力及时间		按 GB/T 2951		
	温度	℃	80±2	—	—
	试验结果：压痕深度最大中间值	%	50		

续表

序 号	试 验 项 目	单 位	聚氯乙烯	聚 乙 烯	交联聚乙烯
7	低温弯曲试验 试验条件：温度 试验结果	℃	−35±2 不开裂	—	—
8	低温拉伸试验 试验条件：温度 试验结果：最小伸长率	℃ %	−35±2 20	—	—
9	低温冲击试验 试验条件：温度 试验结果	℃	−35±2 不开裂	—	—
10	吸水试验 试验条件：温度 时间 试验结果：重量法最大吸水量 试验结果：电压法	℃ h mg/cm²	70±2 240 — 不击穿	85±2 336 1 —	85±2 336 1 —
11	收缩试验 试验条件：温度 时间 试验结果：最大允许收缩率	℃ h %	—	100±3 240 4	135±3 240 4
12	热延伸试验 试验条件：温度 载荷时间 机械应力 试验结果：载荷下伸长率 冷却后永久伸长率	℃ min N/cm² % %	—	—	200±3 15 20 175 15
13	熔融指数：老化前允许最大值	g/10min	—	0.4	—

(3) 成品验收试验项目汇总。各型号电缆的成品验收试验项目及试验类型见表 5.2-14。

表 5.2-14 成品验收试验项目

序号	试 验 项 目	试验类型		
		JKV JKLV JKLHV	JKY JKLY JKLHY	JKYJ JKLYJ JKLHYJ
1	结构尺寸			
1.1	导体	T，S	T，S	T，S
1.2	绝缘厚度	T，S	T，S	T，S
1.3	电缆外径	T，S	T，S	T，S
2	电缆拉断力	T，S	T，S	T，S
3	导体直流电阻	T，R	T，R	T，R
4	浸水耐电压试验	T，R	T，R	T，R
5	浸水绝缘电阻	T，S	T，S	T，S
6	绝缘力学性能试验(含原始性能)			
6.1	空气烘箱老化试验	T，S	T，S	T，S
6.2	人工气候老化试验	T，S	T，S	T，S
6.3	热失重	T，S	—	—
6.4	抗开裂试验	T，S	—	—
6.5	高温压力试验	T，S	—	—
6.6	低温卷绕试验	T，S	—	—
6.7	低温拉伸试验	T，S	—	—
6.8	低温冲击试验	T，S	—	—
6.9	吸水试验			
6.9.1	电压法	T，S	—	—
6.9.2	重量法	—	T，S	T，S
6.10	收缩试验	—	T，S	T，S
6.11	热延伸试验	—	—	T，S
6.12	熔融指数	—	T，S	—

续表

序号	试 验 项 目	试验类型		
		JKV JKLV JKLHV	JKY JKLY JKLHY	JKYJ JKLYJ JKLHYJ
7	不延燃试验（单根垂直燃烧）	T，S	—	—
8	耐磨试验	T，S	T，S	—
9	印刷标志耐摩擦试验	T，S	T，S	T，S
10	示例交货长度	R	R	R

注 R为例行试验，S为抽样试验，T为型式试验。

2.2 10kV架空绝缘电缆

10kV架空绝缘电缆有单芯和多芯两种。单芯的结构包含导体、导体屏蔽和绝缘，以及无钢芯承载线，单芯架空绝缘电缆在我国架空输电线路中使用较广。多芯电缆的结构包含导体、导体屏蔽、绝缘和绝缘屏蔽，有的还包含钢芯承载线，最后需要成缆。多芯架空绝缘电缆的敷设、连接和终端处理比较复杂，尤其对中性点不接地电网系统适应性差，国内很少使用。本节仅介绍单芯10kV架空绝缘电缆。

10kV单芯架空绝缘电缆分普通型和轻型两种，轻型电缆的绝缘较薄，且无导体屏蔽层，国内用户较少选用轻型电缆。从绝缘材料来说，交联聚乙烯为主体，高密度聚乙烯绝缘很少使用。电缆的型号、名称、规格和用途见表5.2-15。

(1) 使用特性：

1) 电缆适用于交流额定电压为10（12）kV的架空电力线路。轻型架空绝缘电缆单相接地故障时间每次允许不大于1min；普通型每次最长不超过8h，每年累计不超过125h。

2) 高密度聚乙烯绝缘的工作温度不超过75℃。交联聚乙烯绝缘不超过90℃。由于单芯电缆不含承载线，因此导体工作温度常取决于金属材料的规定和线路设计的影响，有时应低于75℃和90℃，且不应超过上述绝缘的规定温度。

3）高密度聚乙烯绝缘的短路（持续时间最长不超过5s）温度不超过 150℃。交联聚乙烯绝缘不超过 250℃。

4）电缆的敷设温度应不低于—20℃。

5）电缆的允许弯曲半径应不小于电缆弯曲试验时的圆柱体直径。

6）电缆架设时，应考虑电缆和树木保持一定距离，电缆运行时允许电缆和树木频繁接触。

(2) 结构和技术要求。对 10kV 架空电缆导体的铜芯、铝芯和铝合金芯所用单线的要求，与 1kV 架空绝缘电缆的相应金属单线相同。导体应采用紧压圆形绞合铜、铝或铝合金导线，导体绞合的节距比、绞向应符合 GB 3957 的规定。导体中的单线在 7 根及以下均不允许有接头，7 根以上的绞线中单线允许有接头，但成品绞线上两接头间的距离应不小于 15m。导体表面应光洁、无油污、无损伤绝缘的毛刺、锐边以及凸起或断裂的单线。导体结构和直流电阻应符合表 5.2-16 规定，单线直径不进行考核。电缆导体屏蔽厚度、绝缘厚度和导体抗拉力应符合表 5.2-17 的规定。交联聚乙烯材料性能以表 5.2-7 为准。

表 5.2-15　　单芯 10kV 架空绝缘电缆的型号、名称、规格和用途

型号	产品名称	导体标称截面积（mm^2）	主要用途
JKYJ	铜芯交联聚乙烯绝缘架空电缆	10～300	架空固定敷设 软铜芯产品用于变压器引下线
JKY	铜芯聚乙烯绝缘架空电缆		
JKTRYJ	软铜芯交联聚乙烯绝缘架空电缆		
JKTRY	软铜芯聚乙烯绝缘架空电缆		
JKLYJ	铝芯交联聚乙烯绝缘架空电缆	10～300	架空固定敷设
JKLHYJ	铝合金芯交联聚乙烯绝缘架空电缆		
JKLY	铝芯聚乙烯绝缘架空电缆		
JKLHY	铝合金芯聚乙烯绝缘架空电缆		
JKLYJ/Q	轻型铝芯交联聚乙烯绝缘架空电缆		
JKLHYJ/Q	轻型铝合金芯交联聚乙烯绝缘架空电缆		
JKLY/Q	轻型铝芯聚乙烯绝缘架空电缆		
JKLHY/Q	轻型铝合金芯聚乙烯绝缘架空电缆		

表 5.2-16　　10kV 架空绝缘电缆导体结构和直流电阻

标称截面积（mm^2）	导体中单线最少根数	导体外径（参考值）（mm）	导体最大电阻（Ω/km）（20℃时）			
			硬铜	软铜	铝	铝合金
10	6	3.8	—	1.830	3.080	—
16	6	4.8	—	1.150	1.910	—
25	6	6.0	0.749	0.727	1.200	1.393
35	6	7.0	0.540	0.524	0.868	1.007
50	6	8.3	0.399	0.387	0.641	0.744
70	12	10.0	0.276	0.268	0.443	0.514
95	15	11.6	0.199	0.193	0.320	0.371
120	18	13.0	0.158	0.153	0.253	0.294
150	18	14.6	0.128	—	0.206	0.239
185	30	16.2	0.102	—	0.164	0.190
240	34	18.4	0.077 7	—	0.125	0.145
300	34	20.6	0.061 9	—	0.100	0.110

(3) 成品电缆性能试验项目。

1）20℃时导体电阻应符合表 5.2-16 规定。

2）绝缘非电性试验应符合表 5.2-18 的要求。

3）室温浸水交流电压试验：电缆浸水至少 1h 后，进行 1min 耐电压试验。试验电压对轻型电缆为 12kV，对于普通型电缆为 18kV，电缆应不发生击穿。

4）室温浸水绝缘电阻试验：轻型电缆的绝缘电阻应不小于 1000MΩ · km，普通型电缆应不小于 1500MΩ · km。

5）4h 交流电压试验：电缆浸入水中，对轻型电缆加 12kV 交流电压，对普通型电缆加 18kV 交流电压，电缆应

表 5.2-17　　电缆尺寸、绝缘厚度和导体抗拉力

导体标称截面积（mm^2）	导体屏蔽最小厚度（mm）	绝缘标称厚度（mm）		导体拉断力（不小于）（N）		
		轻型绝缘	普通型绝缘	硬铜芯	硬铝芯	铝合金芯
10	0.5	—	3.4	—	—	—
16	0.5	—	3.4	—	—	—
25	0.5	2.5	3.4	8465	3762	6284
35	0.5	2.5	3.4	11 731	5177	8800
50	0.5	2.5	3.4	16 502	7011	12 569
70	0.5	2.5	3.4	23 461	10 354	17 596
95	0.6	2.5	3.4	31 759	13 727	23 880
120	0.6	2.5	3.4	39 911	17 339	30 164
150	0.6	2.5	3.4	49 505	21 033	37 706
185	0.6	2.5	3.4	61 846	26 732	46 503
240	0.6	2.5	3.4	79 823	34 679	60 329
300	0.6	2.5	3.4	99 788	43 349	75 411

表 5.2-18　　绝缘非电性试验要求

序号	试验项目	单位	高密度聚乙烯	交联聚乙烯
1	原始力学性能			
	抗张强度：最小中间值	MPa	10.0	12.5
	断裂伸长率：最小中间值	%	300	200
2	空气烘箱老化后力学性能			
	老化条件：温度	℃	100±2	135±2
	时间	h	240	168
	抗张强度：最小中间值	MPa	—	—
	最大变化率	%	—	±25
	断裂伸长率：最小中间值	%	300	—
	最大变化率	%	—	±25
3	人工气候老化试验			
	老化时间	h	1008	1008
	0～1008 抗张强度最大变化率	%	±30	±30
	断裂伸长率最大变化率	%	±30	±30
	504～1008 抗张强度最大变化率	%	±15	±15
	断裂伸长率最大变化率	%	±15	±15
4	热延伸试验			
	试验条件：温度	℃		200±3
	载荷时间	min		15
	机械应力	N/cm^2	—	20
	试验结果：载荷下伸长率	%		175
	冷却后永久伸长率	%		15
5	熔融指数：老化前允许最大值	g/10min	0.4	—

不发生击穿。

6）弯曲试验：电缆按 GB 2951.23 进行弯曲试验，试验的圆柱体直径为 $20(D+d)\pm5\%$mm。其中 D 为电缆外径，d 为导体直径。

7）弯曲试验后的冲击和交流电压试验：电缆经弯曲试验后，浸入水中至少 1h，然后进行正负各 10 次冲击电压试验，冲击电压峰值对轻型电缆为 75kV，对于普通型电缆为 93.8kV，电缆应不击穿。然后轻型电缆施加交流电压 12kV；普通型电缆施加交流电压 18kV，时间为 15min，电缆应不击穿。

8）弯曲试验后的 4h 交流电压试验：电缆经弯曲试验后，电缆浸入水中，对轻型电缆加 12kV 交流电压，对普通型电缆加 18kV 交流电压，电缆应不发生击穿。

9）绝缘耐漏电痕迹试验：试验电压为 4kV，喷水 101 次，电缆表面应无烧焦，泄漏电流应不超过 0.5A。

10）绝缘粘附力（滑脱）试验：导体与绝缘之间的粘附力（滑脱）应不小于 180N。

（4）成品验收试验项目汇总。10kV 电缆的成品验收试验项目及试验类型见表 5.2-19。

表 5.2-19　　成品验收试验项目

序号	试验项目	试验类别
1	导体直流电阻试验	R
2	电缆绝缘电阻试验	R
3	电缆交流电压试验	R
4	结构和尺寸检查	S
4.1	导体结构	S
4.2	绝缘厚度	S
4.3	屏蔽层厚度	S
5	交流电压试验	S
6	交联聚乙烯绝缘热延伸试验	S，T
7	弯曲试验及续后的试验	T
7.1	冲击电压试验	T
7.2	4h 交流电压试验	S，T
8	绝缘耐漏电痕迹试验	T
9	导体拉力试验	T
10	老化前绝缘力学性能试验	T
11	老化后绝缘力学性能试验	T
12	高密度聚乙烯绝缘熔融指数试验	T
13	绝缘粘附力（滑脱）试验	T
14	耐人工气候试验	T
15	印刷标志耐擦试验	T
16	耐磨试验	T

3　架空绝缘电缆的特殊试验方法

架空绝缘电缆的特殊试验方法有人工气候老化试验、绝缘耐磨试验、绝缘耐漏电流痕迹试验以及导体与绝缘的粘附力试验。

3.1　人工气候老化试验方法

本试验方法适用于聚氯乙烯、聚乙烯、交联聚乙烯架空绝缘电缆的人工气候老化性能测定。

（1）试验设备。试验设备为氙灯气候老化箱，氙灯功率为 6kW，试样转架直径为 800～959mm，高为 365mm，试样转架每分钟旋转一周。箱体温度控制为 55℃±2℃，相对湿度为（85±5）%。喷水应为清洁的自来水，喷水水压为 0.12～0.15MPa，喷水嘴内径为 0.8mm。喷水和光照周期为 120min，每周期内 18min 喷水和光照、102min 停止喷水而单独光照。

其他辅助设备有：臭氧发生装置、工业用二氧化硫、－40℃冷冻箱和拉力试验机。

（2）试样制备。从被试电缆的端部 500mm 处，切取足够长度，能供 3 组试验测定有效性能的样段，有机械损伤的样段不能作为试样用于试验。第 1 组试样至少 5 个，供原始性能测量用；第 2 组试样至少 5 个，供 1008h 光老化后性能测量用；第 3 组试样至少 5 个，供 504～1008h 光老化后性能测量用。

（3）试验步骤：

1）第 1 组试样保存在阴凉干燥处，第 2、第 3 组试样应放入氙灯气候箱内进行试验。其中第 3 组试样应在试验开始 504h 后放入，在放入前也应保存在阴凉干燥处。

2）试验循环：整个试验持续 6 个星期，每星期为一次循环，其中前 6 天按上述试验设备规定的条件进行试验，第 7 天按下述的调节 a 或 b 或 c 规定的条件进行处理。

调节 a：经 6 天光老化的试样，应在温度为 40℃±3℃，含 0.067%二氧化硫和浓度大于 20×10^{-6} 臭氧的环境中放置一天。

调节 b：经 6 天光老化的试样，应移至－25℃±2℃的冷冻箱内，进行冷热试验，共进行 3 次，每次 2h，2 次热震的间隔时间应不小于 1h。

调节 c：经 6 天光老化的试样，应放置于温度为 40℃±3℃、含 0.067%二氧化硫、且为饱和湿度的容器内，经 8h 后打开容器，再在试验室环境中放置 16h。

3）第 2 和第 3 组试样完成全部规定的老化试验后，取出试样，置于环境温度下存放至少 16h，与第 1 组试样对比，进行外观检查。

4）从试样中取出导体，按 GB 2951 的要求，在光照面冲切哑铃片和预处理后，测量老化前后 3 组试样的抗张强度和断裂伸长率。在制作试片时，不允许磨削光照面。

（4）试验结果及计算。先检查光照面、试样应无明显的龟裂。试验结果最终用试样老化前后的抗张强度和断裂伸长率的变化率（%）来判定产品是否符合标准的规定。变化率的计算原理与一般空气热老化相同。

3.2　耐磨性能试验方法

本试验方法适用于架空绝缘电缆耐磨性能的测定。

（1）试验设备。试验装置类似鼠笼式转子，其直径为 120mm，在转子圆周上均匀配置 12 根直径为 12mm 钢制圆棒，固定在转子的两端面上，转子旋转方向应与挂重物一端的重力方向一致，转速为 8r/min±0.5r/min。被试电缆置于转子的钢制圆棒上。被试电缆的导体和转子之间施加 24V 的试验电压。

（2）试样制备。从被试电缆的端部 500mm 处切取 3 根 75cm 长的单芯试样，仔细擦净并弄直试样，然后剥去电缆一端的绝缘，把 24V 电压施加在导体和试验装置之间。

（3）试验步骤。试验前，被试电缆应置于 23℃±5℃的环境中至少 24h。把被试电缆的中点按水平方向置于转子的钢制圆棒上，试样一端固定，另一端悬挂按产品标准规定的重量，并接通 24V 试验电压。如被试电缆耐磨次数大于

5000 次，则在 5000 次时，应擦净试样和钢棒间的磨屑。试验环境温度为 23℃±5℃。

（4）试验结果。如无特殊规定，试验进行至试样露裸导体，即试样和圆棒相接触，此时 24V 试验回路自动开断，记录次数的平均值为耐磨次数，并应符合产品标准的规定。

3.3　粘附力试验

本试验方法适用于架空绝缘电缆的导体与绝缘之间的粘附力测定。

（1）试验设备。

1）最大量程为 1000N 拉力试验机。

2）夹具，见图 5.2-1。

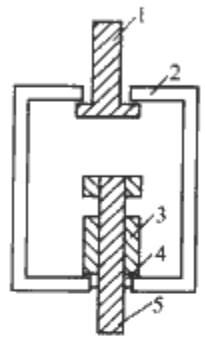


图 5.2-1　粘附力试验夹具示意图

1—夹具上端；2—夹具框架；3—电缆绝缘；4—平面轴承；5—电缆导体

（2）试样制备。从成品电缆上取长度不小于 250mm 的电缆段 3 个，按图 5.2-1 所示尺寸处理，处理时应不损伤绝缘。处理好的试样应在室温下放置 4h 后方可进行试验。

（3）试验步骤。试验在 25℃±5℃下进行。将试样放在图 5.2-1 所示夹具内，拉力机的上下夹具分别夹住上端 1 和电缆导体 5，起动拉力机，拉伸速度为 2cm/min±1cm/min，记录下每个试样的导体与其绝缘产生滑移时的拉力。

（4）试验结果。3 只试样的拉力 T 均应不小于产品标准中规定的粘附力要求。

3.4　绝缘耐漏电痕迹试验方法

本试验适用于测试架空绝缘电缆耐受在污秽条件下，因表面漏电引起电蚀痕迹而造成损坏的能力。

（1）试验设备。试验系统的接线原理如图 5.2-2 所示。

1）工频试验变压器的高压输出应不低于 4kV，高压侧电流应不小于 1A，以满足试验时泄漏电流要求。试验中泄漏电流为 250mA 时，电源高压侧的最大电压降应小于 5%。采用连接到测量电源电流的自动断路器来保护变压器，设定当流过高压侧的瞬时电流达(1.0±0.1)A 时，应在 50～250ms 时间内使电路断开。电压测量的测量设备(电压互感器或其他测量高压的仪器)必须与试样直接并联。不论采用何种方式，测量误差应不超过±3%，电流测量仪表的精度应不低于 1.0 级。

2）喷雾设备有一个或多个喷头，喷程不小于 1m。只要能满足本部分规定的条件，任何形式的喷嘴都可采用。

3）除产品标准另有规定外，试验液体推荐的配方为1L水中含氯化钠（化学纯）约 0.2%和表面活性剂 0.1%的液体，液体的电导率应为 3000μS/cm±400μS/cm。表面活性剂推荐采用仲辛基苯基聚氧乙烯醚，也可用其他相当的表面活性剂。

（2）试样制备。试样长度应不小于 150mm，单芯电缆取绝缘线芯进行试验。试样外观应平整，表面无划痕凹陷等缺陷，如有灰尘、油脂或其他污秽物时，可用绸布等蘸着对试样无腐蚀作用的溶剂擦净，然后再用水冲洗几次。沿试样轴线方向垂直切除一端上的绝缘约 20mm，露出导体，在离试样绝缘切口 100mm 处，垂直于试样轴线绕上直径 1mm 的裸铜线 2～3 圈。试样的另一端面应进行适当的绝缘处理，或采用增大试样长度的方式，以防在试验过程中附着试验液体后引起放电。

（3）试验步骤。将准备好的试样垂直放置，按图 5.2-2 连接，导体接变压器高压端，试样表面的铜线接地。调整喷雾装置，喷头离地面至少 600mm，距离试样约 500mm。喷头轴线与试样轴线呈 45°角，试液直接喷射于试样上，如用多个喷头时，喷头应对称均匀分布于试样周围。试样处的喷雾速度约为 3m/s，喷雾量为(0.5±0.1)mm/min。喷射压力应基本稳定。每喷雾 10s 间歇 20s 为一个喷雾周期。开始喷雾的同时，应在试样上施加 4kV 工频试验电压，试验过程中电压测量值应保持在规定值的 ±3%以内。

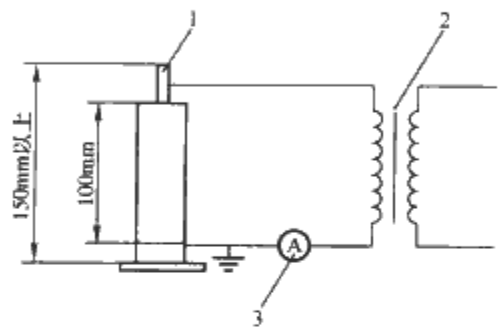


图 5.2-2　耐漏电痕测试系统接线原理图

1—试样；2—试验变压器；3—电流测量仪表

（4）试验结果。在产品标准中规定的喷雾周期数内，试样无下列任一情况者应认为试验合格：表面燃烧；在高压电极和接地极之间形成连续的电弧；表面泄漏电流超过规定值；因绝缘局部受腐蚀而引起试样击穿。

4　架空绝缘电缆的载流量

架空绝缘电缆的载流量参考值见表 5.2-20。该表的计算基础条件为：环境温度为 40℃、风速为 0.5m/s、日照强度为 1000W/m²。铝合金导体电阻虽然大于铝导体，但对载流量影响不很大，在同样导体温度和环境温度时，可近似取铝导体载流量数据的 95%。

表 5.2-20　　架空绝缘电缆载流量参考值

导体标称截面（mm²）	环境温度 40℃时的载流量（A）					
	导体温度 70℃		导体温度 80℃		导体温度 90℃	
	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯
16	84	109	100	130	112	146
25	112	145	133	173	151	196
35	135	176	161	209	183	238
50	168	218	202	262	230	299
70	210	273	253	329	289	376
95	250	325	304	395	347	451
120	289	375	353	459	405	526
150	327	425	400	520	460	598
185	371	482	456	593	526	684
240	435	566	538	699	622	808
300	496	645	617	892	715	929

第 3 章 输配电用架空导线

输配电用架空导线是裸制品中使用最广的产品。我国长距离高压输电线正在蓬勃发展，架空导线的制造技术逐步提高，并开始 1000kV 等级输电线的研究。国际电工会议（IEC）对输配电用架空导线进行了很多研究和开发工作，IEC 标准就是体现成果之一。中国架空导线标准的制订，在不同历史时期，以等效采用或等同采用 IEC 标准为原则，但在实施过程中需结合国内实际情况。有些老标准虽然已被新标准替代，但为了便于读者查阅，本章仍适当收编一些老标准的数据供参考。

输配电用裸线不是一种简单的导体，而是具有综合性要求的产品，需要从材料选择、结构设计以及特殊试验等方面考虑，以满足这些综合要求。输配电用裸线的导电性能、机械和物理性能直接影响输电线路导线的设计和运行。如导线电阻、拉断力、弹性模量、线膨胀系数、振动疲劳性、蠕变性、耐热性和单位长度质量等，与线路容量、塔杆高度和跨距设计有关。近代高压和超高压输电线路，导线电晕起始性能也是重要参数之一。

本章首先叙述绞合规则，也是导线的结构计算方法。其次介绍单线的参数和性能，单线是架空导线的基本元件，单线品种和规格的选择，直接影响架空导线的性能。而后介绍架空导线的成品结构、参数、性能及部分试验。

1 绞线的绞合规则

绞线的绞合规则分简单绞合、组合绞合、复合绞合和特种绞合 4 种，详见文献［1］。绞合方式对绞线的尺寸和机械性能有一定影响。

1.1 简单绞合

简单绞合也称为正规绞合，由材质相同、线径相等的线材绞合而成。理论上中心层的单线根数可取 1～6 根，从中心层向外每层的单线根数递增 6 根，相邻层的绞向相反，最外层的绞向为右向。铝绞线、铝合金绞线和铝包钢绞线大多采用这种绞合方式，参考图 5.3-1。简单绞线结构的理论计算参数见表 5.3-1。

表 5.3-1 简单绞合结构理论计算示例

（d 为单线直径）

中心层根数	结构参数	绞线层数(序数 1 即为中心层)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	各层单线根数 z	1	6	12	18	24	30	36
	绞合单线总数 Z	1	7	19	37	61	91	127
	绞线外径 D	$1d$	$3d$	$5d$	$7d$	$9d$	$11d$	$13d$
	填充系数 η(%)	100	78	76	75	75	75	75
2	各层单线根数 z	2	8	14	20	26	32	38
	绞合单线总数 Z	2	10	24	44	70	102	140
	绞线外径 D	$2d$	$4d$	$6d$	$8d$	$10d$	$12d$	$14d$
	填充系数 η(%)	50	62	67	70	70	71	72
3	各层单线根数 z	3	9	15	21	27	33	39
	绞合单线总数 Z	3	12	27	48	75	108	147
	绞线外径 D	$2.15d$	$4.15d$	$6.15d$	$8.15d$	$10.15d$	$12.15d$	$14.15d$
	填充系数 η(%)	64	69	71	72	73	73	74
4	各层单线根数 z	4	10	16	22	28	34	40
	绞合单线总数 Z	4	14	30	52	80	114	154
	绞线外径 D	$2.4d$	$4.4d$	$6.4d$	$8.4d$	$10.4d$	$12.45d$	$14.4d$
	填充系数 η(%)	60	72	73	74	74	74	75
5	各层单线根数 z	5	11	17	23	29	35	41
	绞合单线总数 Z	5	16	33	56	85	120	161
	绞线外径 D	$2.7d$	$4.7d$	$6.7d$	$8.7d$	$10.7d$	$12.7d$	$14.7d$
	填充系数 η(%)	69	73	74	74	74	74	75
6	各层单线根数 z	6	12	18	24	30	36	42
	绞合单线总数 Z	7	19	37	61	91	127	168
	绞线外径 D	$3d$	$5d$	$7d$	$9d$	$11d$	$13d$	$15d$
	填充系数 η(%)	67	72	73	74	74	75	75

1.2 组合绞合

组合绞合由导电单线和增强单线 2 组单线绞合而成，组合绞线存在 2 种情况，第 1 种是导电单线和增强单线直径相等，此时绞线规则与简单绞合相同，参见图 5.3-2。第 2 种是增强单线和导电单线直径不等，一般先将增强单线简单绞合成中心组，根据该绞线组的外径，仍按简单绞线的原则确定导电单线的各层分布。钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线和铝合金芯铝绞线等采用组合绞合方式。

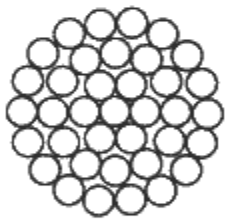


图 5.3-1 简单绞合导线

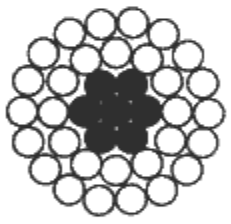


图 5.3-2 组合绞合导线

1.3 复合绞合

复合绞合由材质相同、线径相等的单线，先通过束合或绞合成股，再由线股用简单的绞合方式绞成。第 2 次复绞的方向可与束线股的绞向相同或相反，参见图 5.3-3。束线是由多根单线以同一方向一次束合而成，束线中的各单线，其位置互相不严格固定，所以束线外径不一定完全呈圆形，束线的外径稍比简单绞线外径小一些，当束线股和简单绞线所含单线根数和直径相等时，束线股外径为简单绞线外径的 99.0%～99.9%。复合绞合可用于扩径导线，也常用于软铜绞线、电刷线以及电气装备用电线电缆类中某些产品的导电线芯。

1.4 特殊绞合

特殊绞合由不同材质和不同形状的线材用特殊组合方式绞合而成。这种结构用于扩径导线、自阻尼导线、压缩型导线和光纤复合架空地线等。扩径导线的结构中心可设置支撑构件，如波纹铝管、蛇皮管等，支撑构件外再绞制镀锌钢线和铝线和铝包钢线等，参见图 5.3-4。

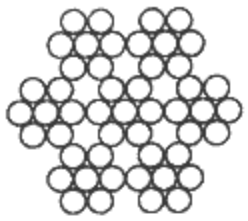


图 5.3-3　复合绞合导线



图 5.3-4　特殊绞合导线

2　圆形单线的参数及性能

圆形单线是指横截面呈圆形的高导电金属单线、增强用金属单线或二者复合成的单线，包括铜线、铝线、铝合金线、铝包钢线、铜包钢线和镀锌钢线等。

2.1　铜单线

参考 GB 3953—1989《电工圆铜线》标准，铜单线分 TR 型软铜单线、TY 型硬铜单线和 TYT 型特硬铜单线。铜单线的电气、力学性能和物理常数见表 5.3-2。

表 5.3-2　　铜单线电气、力学性能和物理常数

型号	直径范围 (mm)	密度 (kg/dm³) (20℃时)	抗拉强度 (MPa)	线膨胀系数 (×10⁻⁶℃⁻¹)	电阻率 (nΩ·m) (20℃时)	电阻温度系数 (℃⁻¹)
TR	0.02～14.0	8.89	245～289	17.0	17.241	0.003 93
TY	0.02～14.0		271～421		17.77～17.96	0.003 77
TYT	1.50～5.00		408～446		17.77～17.96	0.003 81

2.2　铝单线

参考 GB 3955—1983《电工圆铝线》标准，铝单线品种较多，包括软铝线及硬铝线，硬铝线又分为 4 种。标准整顿以后，架空绞线用硬铝线已归入 GB/T 17048《架空绞线用硬圆铝线》标准。LR 型软铝线、LY4 型和 LY6 型硬铝线的电气、力学性能和物理常数见表 5.3-3。参考 GB/T 17048—1997 标准，输电架空导线用硬铝单线型号为 LY9，直径范围为 1.25～5.00mm，硬铝线电导率相当于 61.0% IACS（国际退火铜标准）。LY9 的计算用数值和性能见表 5.3-4，抗拉强度最小值见表 5.3-5。对其做卷绕性能试验时，以不超过 60r/min 的速度，在直径与硬铝线直径相等的芯轴上卷绕 8 圈，然后退绕 6 圈，再重新紧密卷绕，硬铝线应不断裂。

表 5.3-3　　铝单线的电气、力学性能和物理常数

型号	直径范围 (mm)	密度 (kg/dm³) (20℃时)	抗拉强度 (MPa)	线膨胀系数 (×10⁻⁶℃⁻¹)	电阻率 (nΩ·m) (20℃时)	电阻温度系数 (℃⁻¹)
LR	0.30～10.00	2.703	最大 95	23.0	28.00	0.004 07
LY4	0.30～6.00		95～125		28.264	0.004 03
LY6	0.30～10.00		125～165		28.264	0.004 03

表 5.3-4　　LY9 型硬铝线计算用数值和性能

型号	直径公差 (mm)	密度 (kg/dm³) (20℃时)	线膨胀系数 (×10⁻⁶℃⁻¹)	电阻率 (nΩ·m) (20℃时)	电阻温度系数 (℃⁻¹)
LY9	$D\leqslant 3.00$ 为 ±0.03 $D>3.00$ 为 ±1%d	2.703	23.0	最大 28.264	0.004 03

表 5.3-5　　LY9 型硬铝线抗拉强度最小值

标称直径 d (mm)	抗拉强度最小值 (MPa)	标称直径 d (mm)	抗拉强度最小值 (MPa)
$d\leqslant 1.25$	200	$2.25<d\leqslant 2.50$	175
$1.25<d\leqslant 1.50$	195	$2.50<d\leqslant 3.00$	170
$1.50<d\leqslant 1.75$	190	$3.00<d\leqslant 350$	165
$1.75<d\leqslant 2.00$	185	$350<d\leqslant 5.00$	160
$2.00<d\leqslant 2.25$	180	—	—

2.3　铝合金线

参考 JB/T 8134—1997《架空绞线用铝—镁—硅系合金圆线》标准，输电架空导线用铝—镁—硅合金线的直径范围为 1.25～4.50mm，LHA1 型电导率相当于 52.5% IACS（国际退火铜标准），LHA2 型电导率相当于 53.0% IACS。铝合金线的计算用数值和性能见表 5.3-6。抗拉强度最小值及 250mm 标距的断裂伸长率见表 5.3-7。卷绕性能试验时，以不超过 60r/min 的速度，在直径与铝合金线直径相等的芯轴上卷绕 8 圈，铝合金线不应断裂。

表 5.3-6　　铝—镁—硅合金线计算用数值和性能

型号	电阻率 (nΩ·m) (20℃时)	电阻温度系数 (℃⁻¹)	密度 (kg/dm³) (20℃时)	线膨胀系数 (×10⁻⁶℃⁻¹)	直径公差 (mm)
LHA1	最大 32.840	0.003 6	2.703	23.0	$d\leqslant 3.00$ 为 ±0.03 $d>3.00$ 为 ±1%d
LHA2	最大 32.530				

表 5.3-7　　铝—镁—硅合金线抗拉强度和断裂伸长率最小值

标称直径 d (mm)	LHA1 型		LHA2 型	
	抗拉强度最小值 (MPa)	断裂伸长率最小值 (%)	抗拉强度最小值 (MPa)	断裂伸长率最小值 (%)
$d\leqslant 3.5$	325	3.0	295	3.5
$d>3.5$	315	3.0	295	3.5

2.4　铝包钢线

参考 GB/T 17937—1999《电工用铝包钢线》标准，电工用铝包钢线分级有 LB1、LB2、LB3 和 LB4 共 4 级，相应的电导率为 20.3%、27%、30%和 40% IACS。这与 IEC 61232 标准中 20SA、27SA、30SA 和 40SA 相对应。铝包钢线密度见表 5.3-8，直径公差见表 5.3-9，最小铝层厚度见表 5.3-10，物理常数见表 5.3-11，抗拉强度最小值和 1%伸长时的应力最小值和 20℃时的电阻率最大值见表 5.3-12。铝包钢线需进行扭转试验，在 100 倍标称直径的长度上，铝包钢线应能经受不少于 20 次扭转而不断裂。扭转到试样断裂后，用正常目力观察断面，铝层不应脱离。

表 5.3-8　　铝包钢线密度

型号(等级)	IEC 1232 型号	铝比 (%)	钢比 (%)	标称密度(g/cm³) (20℃时)
LB1A	20SA A	25	75	6.59
LB1B	20SA B	25	75	6.53
LB2	27SA	37	63	5.91
LB3	30SA	43	57	5.61
LB4	40SA	62	38	4.64

表 5.3-9 铝包钢线直径公差

标称直径 d(mm)	公差(mm)
$d \geqslant 2.67$	$\pm 1.5\%d$
$d < 2.67$	±0.04

表 5.3-10 铝包钢线最小铝层厚度

等 级	最小铝层厚度(mm)
LB1	标称直径 1.8mm 以下为 8% 铝包钢线标称半径 标称直径 1.8mm 及以上为 10% 铝包钢线标称半径
LB2	14% 铝包钢线标称半径
LB3	15% 铝包钢线标称半径
LB4	25% 铝包钢线标称半径

表 5.3-11 铝包钢线物理常数

等 级	LB1		LB2	LB3	LB4
	A	B			
最终弹性模数实测(GPa)	162	155	140	132	109
线膨胀系数(K^{-1})	13.0×10^{-6}	12.6×10^{-6}	13.4×10^{-6}	13.8×10^{-6}	15.50×10^{-6}
定质量电阻温度系数(K^{-1})	0.003 6	0.003 6	0.003 6	0.003 8	0.004 0

表 5.3-12 铝包钢线力学性能和电阻值

等级	型式	标称直径 d (mm)	抗拉强度最小值 (MPa)	1%伸长时的应力最小值 (MPa)	电阻率最大值 (nΩ·m)(20℃时) (对应于 IACS 电导率/%)
LB1	A	$1.24<d\leqslant3.25$	1340	1200	84.80(20.3)
		$3.25<d\leqslant3.45$	1310	1180	
		$3.45<d\leqslant3.65$	1270	1140	
		$3.65<d\leqslant3.95$	1250	1100	
		$3.95<d\leqslant4.10$	1210	1100	
		$4.10<d\leqslant4.40$	1180	1070	
		$4.40<d\leqslant4.60$	1140	1030	
		$4.60<d\leqslant4.75$	1100	1000	
		$4.75<d\leqslant5.50$	1070	1000	
	B	$1.24<d\leqslant5.50$	1320	1100	
LB2	—	$2.50<d\leqslant5.00$	1080	800	63.86(27)
LB3	—	$2.50<d\leqslant5.00$	880	650	57.47(30)
LB4	—	$2.50<d\leqslant5.00$	680	500	43.10(40)

2.5 铜包钢线

铜包钢线的型号为 GTA 和 GTB，目前尚无 GB/T 和 JB/T 标准，各企业标准的参数也不完全相同。GTA 型用于通信，GTB 可用于电力。不同工艺的铜包钢线，其铜含量差异甚大，有的铜截面占 40%～50%，有的只占 15%～20%（表 5.3-13 中近似 20%）。铜包钢线强度较高，导电性较好，可用于架空通信线路和严重腐蚀地区的架空输电线路。铜包钢线的电阻、机械性能和铜层厚度见表 5.3-13。铜包钢线的扭转试验，对直径 1.20～4.00mm 的试样长度为 200mm，对直径 5.00～6.00mm 的试样为 300mm，定向扭转 7 次后，不得有折边及夹杂物质。

表 5.3-13 铜包钢线直径及其公差、铜层厚度、电阻和机械性能

标称直径 (mm)	线径公差 (mm)	铜层厚度 (mm)(近似截面 20%)	抗拉强度 (MPa)	耐弯曲试验		直流电阻 (Ω/km)(20℃时)
				弯曲次数	弯曲半径 (mm)	
1.20	±0.04	0.06	735～750	≥15	5	≤47.30
1.60	±0.04	0.08	735～750	≥12	5	≤26.00
2.00	±0.04	0.10	735～750	≥10	5	≤16.40
2.20	±0.04	0.11	735～750	≥9	5	≤13.50
2.50	±0.04	0.12	735～750	≥8	10	≤10.40
2.80	±0.04	0.14	735～750	≥8	10	≤8.20
3.00	±0.04	0.15	735～750	≥8	10	≤7.10
4.00	±0.05	0.21	735～750	≥8	10	≤4.00
6.00	±0.05	0.23	637～650	≥6	10	≤2.00

2.6 镀锌钢线

参考 GB/T 3428—2002《架空绞线用镀锌钢线》标准，按镀锌钢线的强度分 3 级，按钢线镀锌层厚度分 A 级和 B 级 2 种。该标准等同采用 IEC 60888—1987。不同强度钢线的力学性能见表 5.3-14，钢线标称直径、允许公差以及锌层厚度见表 5.3-15。镀锌钢线是绞线的加强构件，绞线的结构设计常说明钢与铝的百分比，此数值会影响绞线的总抗拉力。镀锌钢线的锌层厚度也很重要，不应在制造或架设绞线时擦伤锌层，以免影响产品在使用时的耐腐蚀性能。

表 5.3-14 钢 线 的 力 学 性 能

强度等级	钢线直径 (mm)	抗拉强度 (MPa)(不小于)		应力值 (MPa)(1%伸长时)(不小于)		伸长率 (%)(标距 250mm)(不小于)		扭转次数 (360°)(不小于)		卷绕试验棒芯直径 (倍数)
		A 级	B 级	A 级	B 级	A 级	B 级	A 级	B 级	
普通强度	>1.24～2.25	1340	1240	1170	1100	3.0	4.0	18	未规定	1
	>2.25～2.75	1310	1210	1140	1070	3.0	4.0	16		1
	>2.75～3.00	1310	1210	1140	1070	3.5	4.0	16		1
	>3.00～3.50	1290	1190	1100	1000	3.5	4.0	14		1
	>3.50～4.25	1290	1190	1100	1000	4.0	4.0	12		1
	>4.25～4.75	1290	1190	1100	1000	4.0	4.0	12		1
	>4.75～5.50	1290	1190	1100	1000	4.0	4.0	12		1
高强度	>1.24～2.25	1450	1380	1310	1240	2.5	2.5	16		3
	>2.25～2.75	1410	1340	1280	1210	2.5	2.5	16		3
	>2.75～3.00	1410	1340	1280	1210	3.0	3.0	16		4
	>3.00～3.50	1410	1340	1240	1170	3.0	3.0	14		4
	>3.50～4.25	1380	1280	1170	1100	3.0	3.0	12		4
	>4.25～4.75	1380	1280	1170	1110	3.0	3.0	12		4
	>4.75～5.50	1380	1280	1170	1110	3.0	3.0	12		4

续表

强度等级	钢线直径（mm）	抗拉强度（MPa）（不小于）		应力值（MPa）（1%伸长时）（不小于）		伸长率（%）（标距 250mm）（不小于）		扭转次数（360°）（不小于）		卷绕试验棒芯直径（倍数）
		A 级	B 级	A 级	B 级	A 级	B 级	A 级	B 级	
特高强度	>1.24～2.25	1620	未规定	1450	未规定	2.0	未规定	14		4
	>2.25～2.75	1590		1410		2.0		14		4
	>2.75～3.00	1590		1410		2.5		12		5
	>3.00～3.50	1550		1380		2.5		12		5
	>3.50～4.25	1520		1340		2.5		10		5
	>4.25～4.75	1520		1340		2.5		10		5
	>4.75～5.50	1520		1270		2.5		10		5

表 5.3-15　钢线标称直径及其允许公差

A 级

标称直径（mm）	允许公差（mm）	镀锌层重量最小值（g/m²）
>1.24～1.50	±0.03	185
>1.50～2.25	±0.03	200
>2.25～2.75	±0.04	215
>2.75～3.00	±0.05	230
>3.00～3.50	±.005	245
>3.50～4.25	±0.06	260
>4.25～4.75	±0.06	275
>4.75～5.50	±0.07	290

B 级

标称直径（mm）	允许公差（mm）	镀锌层重量最小值（g/m²）
>1.24～1.50	±0.05	370
>1.50～2.25	±0.05	400
>2.25～2.75	±0.06	430
>2.75～3.00	±0.06	460
>3.00～3.50	±.007	490
>3.50～4.25	±0.09	520
>4.25～4.75	±0.10	550
>4.75～5.50	±0.11	580

3　输电架空导线的参数及性能

输电架空导线由各种单线绞合而成，最常用的是圆线同心绞架空导线，此外有型线同心绞架空导线和特种同心绞架空导线等，大部分品种已经标准化。产品的结构参数包括：单线品种选择、单线直径、单线根数、绞合直径等。产品性能主要考虑力学性能和导电性能以及单位长度的质量，抗拉力和导体电阻等，产品标准中详细地列出了这些参数，为制造部门推荐了产品计算原则，也为使用部门提供了选择导向。有关金属的电阻率（与 IACS 一致）见表 5.3-16。光纤复合架空地线包含了通信用光纤，具有防雷保护和通信两种功能。

表 5.3-16　与架空导线计算相关的部分金属电阻率

型　号	电阻率(nΩ·m)	对应于 IASC(%)
LY9	28.264	61
LHA2	32.530	53
LHA1	32.840	52.5
LB2	63.86	27
LB1A　LB1B	84.80	20.3
G1A　G1B	191.57	9
G2A　G2B	191.57	9
G3A	191.57	9

3.1　圆线同心绞架空导线

参考 GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》标准，产品型号和名称见表 5.3-17，该标准等同采用 IEC 61089—1991 标准。圆线同心绞架空导线在绞制过程中对单根金属线的接头有较严格的规定，因为单线接头处的抗拉强度会减弱，影响成品质量。具体的规定如下：单根或多根镀锌钢线或铝包钢线均不应有任何接头；每根制造长度的绞线成品所用的每根铝单线或铝合金单线，只允许有一处接头。当在绞制过程中发生意外断线，并确定不是金属线本身的质量问题所致，则另有处理规定（此处从略），但接头数仍应严格限制。铝线绞制层数为 1、2、3、4 层时，接头数分别限制为 2、3、4、5 个。

表 5.3-17　圆线同心绞架空导线型号和名称

产品型号	产品名称
JL	铝绞线
JLHA2，JLHA1	铝合金绞线
JL/G1A，JL/G1B，JL/G2A，JL/G2B，JL/G3A	钢芯铝绞线
JL/G1AF，JL/G2AF，JL/G3AF	防腐型钢芯铝绞线
JLHA2/G1A，JLHA2/G1B，JLHA2/G3A	钢芯铝合金绞线
JLHA1/G1A，JLHA1/G1B，JLHA1/G3A	钢芯铝合金绞线
JL/LHA2，JL/LHA1	铝合金芯铝绞线
JL/LB1A	铝包钢芯铝绞线
JLHA2/LB1A，JLHA1/LB1A	铝包钢芯铝合金绞线
JG1A，JG1B，JG2A，JG3A	钢绞线
JLB1A，JLB1B，JLB2	铝包钢绞线

3.1.1　铝绞线

铝绞线是常用的输配电架空导线，但抗拉强度较低，其结构和性能见表 5.3-18。随着输电电压的不断增高、塔杆标高和跨距加大，铝绞线已不适应使用要求，所以用量逐步减少。现在城市内已不允许中压裸线供电，曾有一段时期城市改用架空绝缘电缆，现在大城市中又改用地下电缆，所以铝绞线在市内使用已经淡化。

3.1.2　铝合金绞线

铝合金绞线虽然电导率略低于铝绞线，但抗拉强度显著提高，使输电线路总体成本降低。铝合金的电导率和工作温度有较多品种，GB/T 1179—1999 标准仅列入 2 种型号的铝合金绞线，其结构和性能分别见表 5.3-19 和表 5.3-20。

3.1.3　钢芯铝绞线

钢芯铝绞线是输电线路中使用最广泛的品种，在我国占主导地位。过去由于钢锭较小和轧钢设备的限制，钢线连续制造长度较短，也就限制了钢芯铝绞线的整根产品长度，增加了绞线架设的连接接头，现在钢线长度已基本解决。钢芯

铝绞线的结构和性能见表 5.3-21 和表 5.3-22。

3.1.4 钢芯铝合金绞线。

从机械性能方面，钢芯铝合金绞线是钢芯铝绞线的提高产品，与欧洲相比，国内由于价格问题而使用并不很广。钢芯铝合金绞线结构见表 5.3-23 和表 5.3-24，性能见表 5.3-25。

3.1.5 铝合金芯铝绞线

铝合金芯铝绞线适当增加了抗拉强度，适用与某些场合。其结构和性能见表 5.3-26 和表 5.3-27。

3.1.6 铝包钢芯铝绞线

铝包钢芯铝绞线的防腐性能好，并略为提高导电性能，过去国内铝包钢线未能大量供应，因此用量较少，现在的用量已逐年增加。其产品结构见表 5.3-28，性能见表 5.3-31。

3.1.7 铝包钢芯铝合金绞线

铝包钢芯铝合金绞线目前在国内基本没有应用。其产品结构见表 5.3-29 和表 5.3-30，性能见表 5.3-31。

3.1.8 铝包钢绞线

铝包钢绞线抗拉力高，防腐蚀强，电导率与铝层厚度有关，国内一般的主线虽未大量应用，但在架空地线和大跨越导线中常使用。其产品结构和性能见表 5.3-32 和表 5.3-33。

3.1.9 钢绞线

钢绞线结构和性能见表 5.3-34。

表 5.3-18 JL 型铝绞线的结构和性能

规格号	面 积 (mm^2)	单线根数	直径 (mm)		单位长度质量 (kg/km)	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
			单 线	绞 线			
10	10	7	1.35	4.05	27.4	1.95	2.863 3
16	16	7	1.71	5.12	43.8	3.04	1.789 6
25	25	7	2.13	6.40	68.4	4.50	1.145 3
40	40	7	2.70	8.09	109.4	6.80	0.715 8
63	63	7	3.39	10.2	172.3	10.39	0.454 5
100	100	19	2.59	12.9	274.8	17.00	0.287 7
125	125	19	2.89	14.5	343.6	21.25	0.230 2
160	160	19	3.27	16.4	439.8	26.40	0.179 8
200	200	19	3.66	18.3	549.7	32.00	0.143 9
250	250	19	4.09	20.5	687.1	40.00	0.115 1
315	315	37	3.29	23.0	867.9	51.97	0.091 6
400	400	37	3.71	26.0	1102.0	64.00	0.072 1
450	450	37	3.94	27.5	1239.8	72.00	0.064 1
500	500	37	4.15	29.0	1377.6	80.00	0.057 7
560	560	37	4.39	30.7	1542.9	89.60	0.051 5
630	630	61	3.63	32.6	1738.3	100.80	0.045 8
710	710	61	3.85	34.6	1959.1	113.60	0.040 7
800	800	61	4.09	36.8	2207.4	128.00	0.036 1
900	900	61	4.33	39.0	2483.3	144.00	0.032 1
1000	1000	61	4.57	41.1	2759.2	160.00	0.028 9
1120	1120	91	3.96	43.5	3093.5	179.20	0.025 8
1250	1250	91	4.18	46.0	3452.6	200.00	0.023 1
1400	1400	91	4.43	48.7	3866.9	224.00	0.020 7
1500	1500	91	4.58	50.4	4143.1	240.00	0.019 3

表 5.3-19 JLHA2 型铝合金绞线的结构和性能

规格号	面 积 (mm^2)	单线根数	直径 (mm)		单位长度质量 (kg/km)	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
			单 线	绞 线			
16	18.4	7	1.83	5.49	50.4	5.34	1.789 6
25	28.8	7	2.29	6.86	78.7	8.49	1.145 3
40	46.0	7	2.89	8.68	125.9	13.58	0.715 8
63	72.5	7	3.63	10.9	198.3	21.39	0.454 5
100	115	19	2.78	13.9	316.3	33.95	0.287 7
125	144	19	3.10	15.5	395.4	42.44	0.230 2
160	184	19	3.51	17.6	506.1	54.32	0.179 8
200	230	19	3.93	19.6	632.7	67.91	0.143 9
250	288	19	4.39	22.0	790.8	84.88	0.115 1
315	363	37	3.53	24.7	998.9	106.95	0.091 6
400	460	37	3.98	27.9	1268.4	135.81	0.072 1
450	518	37	4.22	29.6	1426.9	152.79	0.064 1
500	575	37	4.45	31.2	1585.5	169.76	0.057 7
560	645	61	3.67	33.0	1778.4	190.14	0.051 6
630	725	61	3.89	35.0	2000.7	213.90	0.045 8
710	817	61	4.13	37.2	2254.8	241.07	0.040 7
800	921	61	4.38	39.5	2540.6	271.62	0.036 1
900	1036	91	3.81	41.8	2861.1	305.58	0.032 1
1000	1151	91	4.01	44.1	3179.0	339.53	0.028 9
1120	1289	91	4.25	46.7	3560.5	380.27	0.025 8
1250	1439	91	4.49	49.4	3973.7	424.41	0.023 1

表 5.3-20　　JLHA1 型铝合金绞线的结构和性能

规格号	面　积 (mm^2)	单线根数	直径（mm）		单位长度质量 (kg/km)	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
			单　线	绞　线			
16	18.6	7	1.84	5.52	50.8	6.04	1.789 6
25	29.0	7	2.30	6.90	79.5	9.44	1.145 3
40	46.5	7	2.91	8.72	127.1	15.10	0.715 8
63	73.2	7	3.65	10.9	200.2	23.06	0.454 5
100	116	19	2.79	14.0	319.3	37.76	0.287 7
125	145	19	3.12	15.6	399.2	47.20	0.230 2
160	186	19	3.53	17.6	511.0	58.56	0.179 8
200	232	19	3.95	19.7	638.7	73.20	0.143 9
250	290	19	4.41	22.1	798.4	91.50	0.115 1
315	366	37	3.55	24.8	1008.4	115.29	0.091 6
400	465	37	4.00	28.0	1280.5	146.40	0.072 1
450	523	37	4.24	29.7	1440.5	164.70	0.064 1
500	581	37	4.47	31.3	1600.6	183.00	0.057 7
560	651	61	3.69	33.2	1795.3	204.96	0.051 6
630	732	61	3.91	35.2	2019.8	230.58	0.045 8
710	825	61	4.15	37.3	2276.2	259.86	0.040 7
800	930	61	4.40	39.6	2564.8	292.80	0.036 1
900	1046	91	3.83	42.1	2888.3	329.40	0.032 1
1000	1162	91	4.03	44.4	3209.3	366.00	0.028 9
1120	1301	91	4.27	46.9	3594.4	409.92	0.025 8

表 5.3-21　　JL/G1A，JL/G1B，JL/G2A，JL/G2B，JL/G3A 型钢芯铝绞线结构

规格号	钢比 (%)	面积（mm^2）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量 (kg/km)
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
16	17	16	2.67	18.7	6	1	1.84	1.84	1.84	5.53	64.6
25	17	25	4.17	29.2	6	1	2.30	2.30	2.30	6.91	100.9
40	17	40	6.67	46.7	6	1	2.91	2.91	2.91	8.74	161.5
63	17	63	10.5	73.5	6	1	3.66	3.66	3.66	11.0	254.4
100	17	100	16.7	117	6	1	4.61	4.61	4.61	13.8	403.8
125	6	125	6.94	132	18	1	2.97	2.97	2.97	14.9	397.9
125	16	125	20.4	145	26	7	2.47	1.92	5.77	15.7	503.9
160	6	160	8.89	169	18	1	3.36	3.36	3.36	16.8	509.3
160	16	160	26.1	186	26	7	2.80	2.18	6.53	17.7	644.9
200	6	200	11.1	211	18	1	3.76	3.76	3.76	18.8	636.7
200	16	200	32.6	233	26	7	3.13	2.43	7.30	19.8	806.2
250	10	250	24.6	275	22	7	3.80	2.11	6.34	21.6	880.6
250	16	250	40.7	291	26	7	3.50	2.72	8.16	22.2	1007.7
315	7	315	21.8	337	45	7	2.99	1.99	5.97	23.9	1039.6
315	16	315	51.3	366	26	7	3.93	3.05	9.16	24.9	1269.7
400	7	400	27.7	428	45	7	3.36	2.24	6.73	26.9	1320.1
400	13	400	51.9	452	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1510.3
450	7	450	31.1	481	45	7	3.57	2.38	7.14	28.5	1485.2
450	13	450	58.3	508	54	7	3.26	3.26	9.77	29.3	1699.1
500	7	500	34.6	535	45	7	3.76	2.51	7.53	30.1	1650.2
500	13	500	64.8	565	54	7	3.43	3.43	10.3	30.9	1887.9
560	7	560	38.7	599	45	7	3.98	2.65	7.96	31.8	1848.2
560	13	560	70.9	631	54	19	3.63	2.18	10.9	32.7	2103.4
630	7	630	43.6	674	45	7	4.22	2.81	8.44	33.8	2079.2
630	13	630	79.8	710	54	19	3.85	2.31	11.6	34.7	2366.3

续表

规格号	钢比（%）	面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
710	7	710	49.1	759	45	7	4.48	2.99	8.96	35.9	2343.2
710	13	710	89.9	800	54	19	4.09	2.45	12.3	36.8	2666.8
800	4	800	34.6	835	72	7	3.76	2.51	7.53	37.6	2480.2
800	8	800	66.7	867	84	7	3.48	3.48	10.4	38.3	2732.7
800	13	800	101	901	54	19	4.34	2.61	13.0	39.1	3004.2
900	4	900	38.9	939	72	7	3.99	2.66	7.98	39.9	2790.2
900	8	900	75.0	975	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	3074.2
1000	4	1000	43.2	1043	72	7	4.21	2.80	8.41	42.1	3100.3
1120	4	1120	47.3	1167	72	19	4.45	1.78	8.90	44.5	3464.9
1120	8	1120	91.2	1211	84	19	4.12	2.47	12.4	45.3	3811.5
1250	4	1250	52.8	1303	72	19	4.70	1.88	9.40	47.0	3867.1
1250	8	1250	102	1352	84	19	4.35	2.61	13.1	47.9	4253.9

表 5.3-22　　钢芯铝绞线额定抗拉力和直流电阻

规格号	钢芯铝绞线额定抗拉力（kN）					直流电阻（Ω/km）（20℃时）
	JL/G1A	JL/G1B	JL/G2A	JL/G2A	JL/G3A	
16	6.08	5.89	6.45	6.27	6.83	1.793 4
25	9.13	8.83	9.71	9.42	10.25	1.147 8
40	14.40	13.93	15.33	14.87	16.20	0.717 4
63	21.63	20.58	22.37	21.63	24.15	0.455 5
100	34.33	32.67	35.50	34.33	38.33	0.286 9
125	29.17	28.68	30.14	29.65	31.04	0.230 4
125	45.69	44.27	48.54	47.12	51.39	0.231 0
160	36.18	35.29	37.42	36.80	38.67	0.180 0
160	57.69	55.86	61.34	59.51	64.99	0.180 5
200	44.22	43.11	45.00	44.22	46.89	0.144 0
200	70.13	67.85	74.69	72.41	78.93	0.144 4
250	68.72	67.01	72.16	70.44	75.60	0.115 4
250	87.67	84.82	93.37	90.52	98.66	0.115 5
315	79.03	77.51	82.08	80.55	85.13	0.091 7
315	106.8	101.7	114.0	110.4	121.2	0.091 7
400	98.36	96.42	102.2	100.3	106.1	0.072 2
400	123.0	117.9	130.3	126.7	137.6	0.072 3
450	107.5	105.3	111.8	109.6	115.9	0.064 2
450	138.4	132.6	146.6	142.5	154.8	0.064 3
500	119.4	117.0	124.3	121.8	128.7	0.057 8
500	153.8	147.3	162.9	158.3	171.9	0.057 8
560	133.7	131.0	139.2	136.5	144.2	0.051 6
560	172.6	167.6	182.5	177.6	192.5	0.051 6
630	150.5	147.4	156.6	153.5	162.2	0.045 9
630	191.8	186.2	202.9	197.4	213.3	0.045 9
710	169.6	166.1	176.4	173.0	282.8	0.040 7
710	216.1	209.8	228.7	222.4	240.4	0.040 7
800	167.4	165.0	172.3	169.8	176.7	0.036 1
800	205.3	198.7	214.7	210.0	224.0	0.036 2
800	243.5	236.4	257.7	250.6	270.9	0.036 2
900	188.3	185.6	193.8	191.1	198.8	0.032 1
900	226.5	219.0	231.8	226.5	244.5	0.032 2
1000	209.3	206.2	215.3	212.3	220.9	0.028 9
1120	234.5	231.2	241.2	237.8	247.8	0.025 8
1120	283.2	276.8	295.9	289.6	307.8	0.025 8
1250	261.8	258.1	269.1	265.4	276.5	0.023 1
1250	316.0	308.9	330.3	323.2	343.5	0.023 2

表 5.3-23　　JLHA2/G1A，JLHA2/G1B，JLHA2/G3A 型钢芯铝合金绞线结构

规格号	钢比（%）	面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
16	17	18.4	3.07	21.5	6	1	1.98	1.98	1.98	5.93	74.4
25	17	28.8	4.80	33.6	6	1	2.47	2.47	2.47	7.41	116.2
40	17	46.0	7.67	53.7	6	1	3.13	3.13	3.13	9.38	185.9
63	17	72.5	12.1	84.6	6	1	3.92	3.92	3.92	11.8	292.8
100	6	115	6.39	121	18	1	2.85	2.85	2.85	14.3	366.4
125	6	144	7.99	152	18	1	3.19	3.19	3.19	16.0	458.0
125	16	144	23.4	167	26	7	2.65	2.06	6.19	16.8	579.9
160	6	184	10.2	194	18	1	3.61	3.61	3.61	18.0	586.2
160	16	184	30.0	214	26	7	3.00	2.34	7.01	19.0	742.3
200	6	230	12.8	243	18	1	4.04	4.04	4.04	20.2	732.8
200	16	230	37.5	268	26	7	3.36	2.61	7.83	21.3	927.9
250	10	288	28.3	316	22	7	4.08	2.27	6.80	23.1	1013.5
250	16	288	46.9	335	26	7	3.75	2.92	8.76	23.8	1159.8
315	7	363	25.1	388	45	7	3.20	2.14	6.41	25.6	1196.5
315	16	363	59.0	422	26	7	4.21	3.28	9.83	26.7	1461.4
400	7	460	31.8	492	45	7	3.61	2.41	7.22	28.9	1519.4
400	13	460	59.7	520	54	7	3.29	3.29	9.88	29.7	1738.3
450	7	518	35.8	554	45	7	3.83	2.55	7.66	30.6	1709.3
450	13	518	67.1	585	54	7	3.49	3.49	10.5	31.5	1955.6
500	7	575	39.8	615	45	7	4.04	2.69	8.07	32.3	1899.3
500	13	575	74.6	650	54	7	3.68	3.68	11.1	33.2	2172.9
560	7	645	44.6	689	45	7	4.27	2.85	8.54	34.2	2127.2
560	13	645	81.6	726	54	19	3.90	2.34	11.7	35.1	2420.9
630	4	725	31.3	756	72	7	3.58	2.39	7.16	35.8	2248.0
630	13	725	91.8	817	54	19	4.13	2.48	12.4	37.2	2723.5
710	4	817	35.3	852	72	7	3.80	2.53	7.60	38.0	2533.4
710	13	817	104	921	54	19	4.39	2.63	13.2	39.5	3069.4
800	4	921	39.8	961	72	7	4.04	2.69	8.07	40.4	2854.6
800	8	921	76.7	997	84	7	3.74	3.74	11.2	41.1	3145.1
900	4	1036	44.8	1081	72	7	4.28	2.85	8.6	42.8	3211.4
900	8	1036	86.3	1122	84	7	3.96	3.96	11.9	43.6	3538.3
1000	8	1151	93.7	1245	84	19	4.18	2.51	12.5	45.9	3916.8
1120	8	1289	105	1391	84	19	4.42	2.65	13.3	48.6	4386.8

表 5.3-24　　JLHA1/G1A，JLHA1/G1B，JLHA1/G3A 型钢芯铝合金绞线结构

规格号	钢比（%）	面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
16	17	18.6	3.10	21.7	6	1	1.99	1.99	1.99	5.96	75.1
25	17	29.0	4.84	33.9	6	1	2.48	2.48	2.48	7.45	117.3
40	17	46.5	7.75	54.2	6	1	3.14	3.14	3.14	9.42	187.7
63	17	73.2	12.2	85.4	6	1	3.94	3.94	3.94	11.8	295.6
100	6	116	6.46	123	18	1	2.87	2.87	2.87	14.3	369.9
125	6	145	8.07	153	18	1	3.21	3.21	3.21	16.0	462.3
125	16	145	23.7	169	26	7	2.67	2.67	6.22	16.9	585.4
160	6	186	10.3	196	18	1	3.63	3.63	3.63	18.1	591.8
160	16	186	30.3	216	26	7	3.02	2.35	7.04	19.1	749.4
200	6	232	12.9	245	18	1	4.05	4.05	4.05	20.3	739.8

续表

规格号	钢比（%）	面积（mm^2）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
200	16	232	37.8	270	26	7	3.37	2.62	7.87	21.4	936.7
250	10	290	28.5	319	22	7	4.10	2.28	6.83	23.2	1023.2
250	16	290	47.3	338	26	7	3.77	2.93	8.80	23.9	1170.9
315	7	366	25.3	391	45	7	3.22	2.15	6.44	25.7	1207.9
315	16	366	59.6	426	26	7	4.23	3.29	9.88	26.8	1475.3
400	7	465	32.1	497	45	7	3.63	2.42	7.25	29.0	1533.9
400	13	465	60.2	525	54	7	3.31	3.31	9.93	29.8	1754.9
450	7	523	36.1	559	45	7	3.85	2.56	7.69	30.8	1725.6
450	13	523	67.8	591	54	7	3.51	3.51	10.5	31.6	1974.2
500	7	581	40.2	621	45	7	4.05	2.70	8.11	32.4	1917.3
500	13	581	75.3	656	54	7	3.70	3.70	11.1	33.3	2193.6
560	7	651	45.0	696	45	7	4.29	2.86	8.58	34.3	2147.4
560	13	651	82.4	733	54	19	3.92	2.35	11.8	35.3	2444.0
630	4	732	31.6	764	45	7	3.60	2.40	7.20	36.0	2269.4
630	13	732	92.7	825	54	19	4.15	2.49	12.5	37.4	2749.5
710	4	825	35.6	861	72	7	3.82	2.55	7.64	38.2	2557.6
710	13	825	104	929	54	19	4.41	2.65	13.2	39.7	3098.6
800	4	930	40.2	970	72	7	4.05	2.70	8.11	40.5	2881.8
800	8	930	77.5	1007	84	7	3.75	3.75	11.3	41.3	3175.1
900	4	1046	45.2	1091	72	7	4.30	2.87	8.60	43.0	3242.0
900	8	1046	87.1	1133	84	7	3.98	3.98	11.9	43.8	3572.0
1000	8	1162	94.6	1257	84	19	4.20	2.52	12.6	46.2	3954.1
1120	8	1301	106	1407	84	19	4.44	2.66	13.3	48.9	4428.6

表 5.3-25 钢芯铝合金绞线额定抗拉力和直流电阻

规格号	钢芯铝合金绞线额定抗拉力（kN）						直流电阻（Ω/km）（20℃时）
	JLHA2/G1A	JLHA2/G1B	JLHA2/G3A	JLHA1/G1A	JLHA1/G1B	JLHA1/G3A	
16	9.02	8.81	9.88	9.67	9.45	10.53	1.793 4
25	13.96	13.62	15.25	14.96	14.62	16.27	1.147 8
40	22.02	21.25	24.17	23.63	22.85	25.79	0.717 4
63	34.68	33.48	37.58	36.48	35.26	39.41	0.455 5
100	41.24	40.79	42.97	45.12	44.67	46.86	0.288 0
125	51.23	50.43	53.47	56.08	55.27	58.34	0.230 4
125	69.86	68.22	76.42	74.88	73.22	81.50	0.231 0
160	65.58	64.56	68.03	69.92	68.89	72.40	0.180 0
160	88.52	86.42	96.61	94.94	92.82	103.1	0.180 5
200	81.97	80.69	85.04	87.40	86.11	90.50	0.144 4
200	110.6	108.0	120.8	118.7	116.0	128.9	0.144 4
250	117.1	115.1	124.7	124.0	122.0	131.7	0.115 4
250	138.3	135.0	151.0	145.4	142.1	158.2	0.115 5
315	136.3	134.5	143.3	148.6	146.8	155.6	0.091 7
315	171.9	166.0	188.4	180.9	174.9	197.6	0.091 7
400	172.1	169.9	180.7	183.0	180.8	191.7	0.072 2
400	201.5	195.5	218.2	217.3	211.3	234.2	0.072 3
450	193.6	191.1	203.3	205.9	203.4	215.7	0.064 2
450	226.6	219.9	245.4	239.3	232.5	255.5	0.064 3
500	215.1	212.3	225.9	228.8	226.0	239.6	0.057 8

续表

规格号	钢芯铝合金绞线额定抗拉力（kN）						直流电阻（Ω/km）（20℃时）
	JLHA2/G1A	JLHA2/G1B	JLHA2/G3A	JLHA1/G1A	JLHA1/G1B	JLHA1/G3A	
500	251.8	244.4	269.7	265.8	258.3	283.9	0.057 8
560	240.9	237.8	253.0	256.2	253.1	268.4	0.051 6
560	283.2	277.5	305.3	298.9	293.2	321.2	0.051 6
630	249.6	247.4	258.1	266.6	264.4	275.2	0.045 9
630	318.6	312.2	343.4	336.3	329.8	361.3	0.045 9
710	281.3	278.9	290.9	300.5	298.0	310.1	0.040 7
710	359.1	351.8	387.0	379.0	371.7	407.2	0.040 7
800	317.0	314.2	327.7	338.6	335.8	349.4	0.036 1
800	356.0	348.4	374.4	378.0	370.3	396.6	0.036 2
800	356.6	353.5	368.7	380.9	377.8	393.1	0.032 1
900	400.5	391.9	421.3	425.3	416.5	446.2	0.032 2
1000	446.4	439.8	471.7	473.9	467.2	499.4	0.028 9
1120	499.9	492.6	528.3	530.7	523.3	559.3	0.025 8

表 5.3-26　　JL/LHA2 型铝合金芯铝绞线结构和性能

规格号	直径（mm）		单线根数		面积（mm^2）			单位长度质量（kg/km）	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）
	单线	绞线	铝	铝合金	铝	铝合金	总和			
16	1.76	5.28	4	3	9.73	7.30	17.0	46.6	3.85	1.789 6
25	2.20	6.60	4	3	15.2	11.4	26.6	72.8	5.93	1.145 3
40	2.78	8.35	4	3	24.3	18.3	42.6	116.5	9.25	0.715 8
63	3.49	10.5	4	3	38.3	28.7	67.1	183.5	14.38	0.454 5
100	4.40	13.2	4	3	60.8	45.6	106	291.2	22.52	0.286 3
125	2.97	14.9	12	7	83.3	48.6	132	362.7	27.79	0.230 2
160	3.36	16.8	12	7	107	62.2	169	464.2	35.04	0.179 8
200	3.76	18.8	12	7	133	77.8	211	580.3	43.13	0.143 9
250	4.21	21.0	12	7	167	97.2	264	725.3	53.92	0.115 1
250	3.04	21.3	18	19	131	138	269	742.2	60.39	0.115 4
315	3.34	23.4	30	7	263	61.3	324	892.6	60.52	0.091 6
315	3.42	23.9	18	19	165	174	339	935.1	76.09	0.091 6
400	3.76	26.3	30	7	334	77.8	411	1133.5	75.19	0.072 1
400	3.85	27.0	18	19	210	221	431	1187.5	95.58	0.072 1
450	3.99	27.9	30	7	375	87.6	463	1275.2	84.59	0.064 1
450	4.08	28.6	18	19	236	249	485	1335.9	107.52	0.064 1
500	4.21	29.4	30	7	417	97.3	514	1416.9	93.98	0.057 7
500	4.31	30.1	18	19	262	277	539	1484.3	119.47	0.057 7
560	4.45	31.2	30	7	467	109	576	1586.9	105.26	0.051 5
560	3.45	31.0	54	7	504	65.4	570	1571.9	101.54	0.051 6
630	3.71	33.4	42	19	454	205	660	1820.0	130.25	0.045 8
630	3.79	34.1	24	37	271	417	688	1897.5	160.19	0.045 8
710	3.94	35.5	42	19	512	282	743	2051.2	146.78	0.040 7
710	4.02	36.2	24	37	305	470	775	2138.4	180.53	0.040 7
800	4.18	37.6	42	19	577	261	838	2311.2	165.39	0.036 1
800	4.27	38.4	24	37	344	530	873	2409.5	203.41	0.036 1
900	4.43	39.9	42	19	649	294	942	2600.1	186.06	0.032 1
900	3.66	40.2	54	37	567	388	955	2638.4	199.54	0.032 1
1000	3.80	41.8	72	19	816	215	1032	2849.1	190.94	0.028 9
1000	3.85	42.4	54	37	630	432	1061	2931.6	221.71	0.028 9
1120	4.02	44.2	72	19	914	241	1155	3191.0	213.85	0.025 8
1120	4.08	44.9	54	37	705	483	1189	3283.4	248.32	0.025 8
1250	4.25	46.7	72	19	1020	269	1289	3561.4	238.68	0.023 1
1250	4.31	47.4	54	37	787	539	1327	3664.5	277.14	0.023 1
1400	4.50	49.4	72	19	1143	302	1444	3988.8	267.32	0.020 7

表 5.3-27　　JL/LHA1 型铝合金芯铝绞线结构和性能

规格号	直径（mm）		单线根数		面积（mm^2）			单位长度质量（kg/km）	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）
	单线	绞线	铝	铝合金	铝	铝合金	总和			
16	1.76	5.29	4	3	9.78	7.33	17.1	46.8	4.07	1.789 6
25	2.21	6.62	4	3	15.3	11.5	26.7	73.1	6.29	1.145 3
40	2.79	8.37	4	3	24.4	18.3	42.8	117.0	9.82	0.715 8
63	3.50	10.5	4	3	38.5	28.9	67.4	184.3	14.80	0.454 5
100	4.41	13.2	4	3	61.1	45.8	107	292.5	23.49	0.286 3
125	2.98	14.9	12	7	83.7	48.8	132	364.1	29.29	0.230 2
160	3.37	16.9	12	7	107	62.5	170	466.0	36.95	0.179 8
200	3.77	18.8	12	7	134	78.1	212	582.5	44.78	0.143 9
250	4.21	21.1	12	7	167	97.6	265	728.1	55.98	0.115 1
250	3.05	21.4	18	19	132	139	271	746.0	64.67	0.115 4
315	3.34	23.4	30	7	263	61.4	325	894.4	62.40	0.091 6
315	3.43	24.0	18	19	166	175	341	940.0	81.48	0.091 6
400	3.77	26.4	30	7	334	78.0	412	1135.8	76.82	0.072 1
400	3.86	27.0	18	19	211	222	433	1193.7	100.30	0.072 1
450	3.99	28.0	30	7	376	87.7	464	1277.8	86.42	0.064 1
450	4.10	28.7	18	19	237	250	487	1342.9	112.84	0.064 1
500	4.21	29.5	30	7	418	97.5	515	1419.8	96.03	0.057 7
500	4.32	30.2	18	19	263	278	542	1492.1	125.38	0.057 7
560	4.46	31.2	30	7	468	109	577	1590.1	107.55	0.051 5
560	3.45	31.1	54	7	505	65.5	570	1573.9	103.53	0.051 6
630	3.72	33.4	42	19	456	206	662	1826.0	134.59	0.045 8
630	3.80	34.2	24	37	272	420	692	1909.0	169.14	0.045 8
710	3.95	35.5	42	19	514	232	746	2057.8	151.68	0.040 7
710	4.03	36.3	24	37	307	473	780	2151.4	190.61	0.040 7
800	4.19	37.7	42	19	579	262	840	2318.7	170.90	0.036 1
800	4.28	38.5	24	37	346	533	879	2424.2	214.78	0.036 1
900	4.44	40.0	42	19	651	294	945	2608.5	192.27	0.032 1
900	3.66	40.3	54	37	569	390	959	2649.5	207.79	0.032 1
1000	3.80	41.8	72	19	818	216	1034	2855.4	195.47	0.028 9
1000	3.86	42.5	54	37	632	433	1066	2943.9	230.88	0.028 9
1120	4.02	44.3	72	19	916	242	1158	3198.1	218.92	0.025 8
1120	4.09	45.0	54	37	708	485	1194	3297.2	258.58	0.025 8
1250	4.25	46.8	72	19	1022	270	1292	3569.3	244.33	0.023 1
1250	4.32	47.5	54	37	791	542	1332	3679.9	288.60	0.023 1
1400	4.50	49.5	72	19	1145	302	1447	3997.6	273.65	0.020 7

表 5.3-28　　JL/LB1A 型铝包钢芯铝绞线结构

规格号	钢比（%）	面积（mm^2）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线	
16	16.7	15	2.56	17.9	6	1	1.81	1.81	1.81	5.43	59.0
25	16.7	24	4.00	28.0	6	1	2.26	2.26	2.26	6.78	92.1
40	16.7	38	6.40	44.8	6	1	2.85	2.85	2.85	8.55	147.4
63	16.7	60	10.08	70.6	6	1	3.58	3.58	3.58	10.7	232.2
100	16.7	96	16.00	112.0	6	1	4.51	4.51	4.51	13.5	368.6
125	5.6	123	6.85	130	18	1	2.95	2.95	2.95	14.8	384.3
125	16.3	120	19.6	140	26	7	2.43	1.89	5.66	15.4	460.8
160	5.6	158	8.77	167	18	1	3.34	3.34	3.34	16.7	491.9
160	16.3	154	25.00	179	26	7	2.74	2.13	6.40	17.4	589.8
200	5.6	197	10.96	208	18	1	3.74	3.74	3.74	18.7	614.9

续表

规格号	钢比（%）	面积（mm^2）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线	
200	16.3	192	31.3	223	26	7	3.07	2.39	7.16	19.4	737.2
250	9.8	244	24.0	268	22	7	3.76	2.09	6.26	21.3	830.9
250	16.3	240	39.1	279	26	7	3.43	2.67	8.00	21.7	921.5
315	6.9	310	21.4	331	45	7	2.96	1.97	5.92	23.7	996.4
315	16.3	303	49.3	352	26	7	3.85	2.99	8.98	24.4	1161.1
400	6.9	393	27.2	420	45	7	3.34	2.22	6.67	26.7	1265.3
400	13.0	387	50.2	438	54	7	3.02	3.02	9.07	27.2	1402.9
450	6.9	442	30.6	473	45	7	3.54	2.36	7.08	28.3	1423.4
450	13.0	436	56.5	492	54	7	3.21	3.21	9.62	28.9	1578.2
500	6.9	492	34.0	525	45	7	3.73	2.49	7.46	29.8	1581.6
500	13.0	484	62.8	547	54	7	3.38	3.38	10.14	30.4	1753.6
560	6.9	550	38.1	589	45	7	3.95	2.63	7.89	31.6	1771.4
560	12.7	543	68.8	612	54	19	3.58	2.15	10.73	32.2	1956.3
630	6.9	619	42.8	662	45	7	4.19	2.79	8.37	33.5	1992.8
630	12.7	611	77.3	688	54	19	3.79	2.28	11.38	34.2	2200.9
710	6.9	698	48.3	746	45	7	4.44	2.96	8.89	35.6	2245.8
710	12.7	688	87.2	775	54	19	4.03	2.42	12.08	36.3	2480.3
800	4.3	791	34.2	826	72	7	3.74	2.49	7.48	37.4	2412.8
800	8.3	784	65.3	849	84	7	3.45	3.45	10.34	37.9	2598.9
800	12.7	775	98.2	874	54	19	4.28	2.57	12.83	38.5	2794.7
900	4.3	890	38.5.	929	72	7	3.97	2.65	7.94	39.7	2714.4
900	8.3	882	73.5	955	84	7	3.66	3.66	10.97	40.2	2923.8
1000	4.3	989	42.7	1032	72	7	4.18	2.79	8.37	41.8	3016.0
1120	4.2	1108	46.8	1155	72	19	4.43	1.77	8.85	44.3	3372.6
1120	8.1	1098	89.4	1187	84	19	4.08	2.45	12.24	44.9	3628.4
1250	4.2	1237	52.2	1289	72	19	4.68	1.87	9.35	46.8	3764.1
1250	8.1	1225	99.8	1325	84	19	4.31	2.59	12.93	47.4	4049.5

表 5.3-29　JLHA2/LB1A 型铝包钢芯铝合金绞线结构

规格号	钢比（%）	面积（mm^2）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝合金	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线	
16	16.7	17.6	2.93	20.5	6	1	1.93	1.93	1.93	5.79	67.5
25	16.7	27.5	4.58	32.0	6	1	2.41	2.41	2.41	7.23	105.4
40	16.7	43.9	7.32	51.2	6	1	3.05	3.05	3.05	9.15	168.7
63	16.7	69.2	11.5	80.7	6	1	3.83	3.83	3.83	11.5	265.6
100	16.7	110	18.3	128	6	1	4.83	4.83	4.83	14.5	421.6
125	5.6	142	7.87	149	18	1	316	3.16	3.16	15.8	441.4
125	16.3	137	22.4	160	26	7	2.59	2.02	6.05	16.4	527.2
160	5.6	181	10.1	191	18	1	3.58	3.58	3.58	17.9	565.0
160	16.3	176	28.6	205	26	7	2.93	2.28	6.85	18.6	674.8
200	5.6	227	12.6	239	18	1	4.00	4.00	4.00	20.0	706.2
250	16.3	220	35.8	256	26	7	3.28	2.55	7.66	20.8	843.5
250	9.8	280	27.5	307	22	7	4.02	2.24	6.71	22.8	952.9
250	16.3	275	44.8	320	26	7	3.67	2.85	8.56	23.2	1054.4
315	6.9	355	24.6	380	45	7	3.17	2.11	6.34	25.4	1143.9
315	16.3	346	56.4	403	26	7	4.12	3.20	9.61	26.1	1328.5
400	6.9	451	31.2	483	45	7	3.57	2.38	7.15	28.6	1452.5
400	13.0	444	57.5	501	54	7	3.23	3.23	9.70	29.1	1606.8
450	6.9	508	35.1	543	45	7	3.79	2.53	7.58	30.3	1634.1
450	13.0	499	64.7	564	54	7	3.43	3.43	10.3	30.9	1807.7
500	6.9	564	39.0	603	45	7	4.00	2.66	7.99	32.0	1815.7
500	13.0	555	71.9	627	54	7	3.62	3.62	10.8	32.6	2008.5
560	6.9	632	43.7	676	45	7	4.23	2.82	8.46	33.8	2033.6
560	12.7	622	78.8	701	54	19	3.83	2.30	11.5	34.5	2241.0
630	6.9	711	49.2	760	45	7	4.49	2.99	8.97	35.9	2287.8
630	12.7	700	88.6	788	54	19	4.06	2.44	12.2	36.5	2521.1

续表

规格号	钢比（%）	面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝合金	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线	
710	6.9	801	55.4	857	45	7	4.76	3.17	9.52	38.1	2578.3
710	12.7	788	99.9	888	54	19	4.31	2.59	12.9	38.8	2841.3
800	4.3	909	39.3	949	72	7	4.01	2.67	8.02	40.1	2772.7
800	8.3	899	74.9	974	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	2982.3
800	12.7	888	113	1001	54	19	4.58	2.75	13.7	41.2	3201.5
900	4.3	1023	44.2	1067	72	7	4.25	2.84	8.51	42.5	3119.3
900	8.3	1012	84.3	1096	84	7	3.92	3.92	11.7	43.1	3355.1
1000	4.3	1137	49.1	1186	72	7	4.48	2.99	8.97	44.8	3465.9
1120	4.2	1274	53.8	1327	72	19	4.75	1.90	9.49	47.5	3875.8
1120	8.1	1260	103	1362	84	19	4.37	2.62	13.1	48.1	4164.0
1250	4.2	1421	60.0	1482	72	19	5.01	2.01	10.0	50.1	4325.6
1250	8.1	1406	114	1520	84	19	4.62	2.77	13.8	50.8	4647.3

表 5.3-30　　JLHA1/LB1A 型铝包钢芯铝合金绞线结构

规格号	钢比（%）	面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	铝包钢	总和	铝	铝包钢	铝	铝包钢	铝包钢芯	绞线	
16	16.7	17.7	2.96	20.7	6	1	1.94	1.94	1.94	5.82	68.1
25	16.7	27.7	4.62	32.3	6	1	2.42	2.42	2.42	7.26	106.4
40	16.7	44.3	7.39	51.7	6	1	3.07	3.07	3.07	9.21	170.2
63	16.7	69.8	11.6	81.4	6	1	3.85	3.85	3.85	11.6	268.0
100	16.7	110	18.5	129	6	1	4.85	4.85	4.85	14.6	425.5
125	5.6	143	7.94	151	18	1	3.18	3.18	3.18	15.9	445.5
125	16.3	139	22.6	161	26	7	2.61	2.03	6.08	16.5	532.0
160	5.6	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	570.3
160	16.3	178	28.9	206	26	7	2.95	2.29	6.88	18.7	680.9
200	5.6	229	12.7	241	18	1	4.02	4.02	4.02	20.1	712.8
200	16.3	222	36.1	358	26	7	3.30	2.56	7.69	20.9	851.2
250	9.8	282	27.7	310	22	7	4.04	2.25	6.74	22.9	961.7
250	16.3	277	45.2	323	26	7	3.69	2.87	8.60	23.4	1064.0
315	6.9	359	24.8	384	45	7	3.19	2.12	6.37	25.5	1154.6
315	16.3	349	56.9	406	26	7	4.14	3.22	9.65	26.2	1340.6
400	6.9	456	31.5	487	45	7	3.59	2.39	7.18	28.7	1466.1
400	13.0	448	58.1	506	54	7	3.25	3.25	9.75	29.3	1621.6
450	6.9	513	35.4	548	45	7	3.81	2.54	7.62	30.5	1649.4
450	13.0	504	65.3	569	54	7	3.45	3.45	10.3	31.0	1824.3
500	6.9	570	39.4	609	45	7	4.01	2.68	8.03	32.1	1832.6
500	13.0	560	72.6	632	54	7	3.63	3.63	10.9	32.7	2027.0
560	6.9	638	44.1	682	45	7	4.25	2.83	8.50	34.0	2052.6
560	12.7	628	79.5	707	54	19	3.85	2.31	11.5	34.6	2261.6
630	6.9	718	49.6	767	45	7	4.51	3.00	9.01	36.1	2309.1
630	12.7	706	89.4	795	54	19	4.08	2.45	12.2	36.7	2544.3
710	6.9	809	55.9	865	45	7	4.78	3.19	9.57	38.3	2602.3
710	12.7	796	101	896	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2867.4
800	4.3	918	39.7	958	72	7	4.03	2.69	8.06	40.3	2798.8
800	8.3	908	75.6	983	84	7	3.71	3.71	11.1	40.8	3010.0
800	12.7	896	114	1010	54	19	4.60	2.76	13.8	41.4	3230.9
900	4.3	1033	44.6	1077	72	7	4.27	2.85	8.55	42.7	3148.6
900	8.3	1021	85.1	1106	84	7	3.93	3.93	11.8	43.2	3386.3
1000	4.3	1148	49.6	1197	72	7	4.50	3.00	9.01	45.0	3498.5
1120	4.2	1286	54.3	1340	72	19	4.77	1.91	9.54	47.7	3912.3
1120	8.1	1271	104	1375	84	19	4.39	2.63	13.2	48.3	4202.7
1250	4.2	1435	60.5	1495	72	19	5.04	2.01	10.1	50.4	4366.4
1250	8.1	1419	116	1535	84	19	4.64	2.78	13.9	51.0	4690.5

表 5.3-31　　铝包钢芯铝绞线和铝包钢芯铝合金绞线的额定抗拉力和直流电阻

规格号	铝包钢芯铝绞线 JL/LB1A		铝包钢芯铝合金绞线 JLHA2/LB1A		铝包钢芯铝合金绞线 JLHA1/LB1A	
	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）
16	5.91	1.792 3	8.7	1.769 4	9.31	1.769 1
25	9.00	1.147 1	13.59	1.132 4	14.54	1.132 3
40	14.21	0.916 9	21.74	0.707 7	23.27	0.707 7
63	21.17	0.455 2	33.09	0.449 4	34.79	0.449 3
100	31.84	0.286 8	50.70	0.283 1	53.38	0.283 1
125	29.18	0.230 4	51.21	0.229 3	55.97	0.229 3
125	44.49	0.230 8	67.40	0.227 9	72.17	0.227 9
160	36.38	0.180 0	64.94	0.179 2	69.21	0.179 2
160	56.18	0.180 3	86.27	0.178 1	92.38	0.178 1
200	43.62	0.144 0	80.67	0.143 3	86.00	0.143 3
200	69.27	0.144 3	107.8	0.142 5	115.4	0.142 4
250	67.80	0.115 3	115.5	0.114 4	122.3	0.114 4
250	86.58	0.115 4	134.7	0.114 0	141.5	0.114 0
315	78.33	0.091 7	134.3	0.091 2	146.3	0.091 2
315	107.6	0.091 6	169.8	0.090 4	178.4	0.090 4
400	97.50	0.072 2	170.6	0.071 8	181.3	0.071 8
400	124.2	0.072 3	199.9	0.071 5	215.2	0.071 5
450	107.5	0.064 2	191.9	0.063 8	204.0	0.063 8
450	139.7	0.064 2	223.6	0.063 6	240.8	0.063 6
500	119.4	0.057 8	213.2	0.057 4	226.6	0.057 4
500	153.9	0.057 8	245.6	0.057 2	259.0	0.057 2
560	133.7	0.051 6	238.8	0.051 3	253.8	0.051 3
560	169.3	0.051 6	277.9	0.051 1	293.0	0.051 1
630	150.5	0.045 8	268.7	0.045 6	285.6	0.045 6
630	190.5	0.045 9	312.6	0.045 4	329.6	0.045 4
710	169.5	0.040 7	302.8	0.040 5	321.8	0.040 5
710	214.7	0.040 7	352.3	0.040 3	371.5	0.040 3
800	167.6	0.036 1	315.4	0.036 0	336.7	0.036 0
800	206.3	0.036 2	347.7	0.035 9	369.1	0.035 9
800	241.9	0.036 1	397.0	0.035 8	418.6	0.035 8
900	188.6	0.032 1	354.9	0.032 0	378.9	0.032 0
900	224.8	0.032 1	391.1	0.031 9	415.2	0.031 9
1000	209.5	0.028 9	394.3	0.028 8	420.9	0.028 8
1120	233.4	0.025 8	440.2	0.025 7	470.1	0.025 7
1120	282.8	0.025 8	494.7	0.025 7	524.7	0.025 7
1250	260.5	0.023 1	491.3	0.023 1	524.6	0.023 1
1250	315.7	0.023 1	552.1	0.023 0	585.6	0.023 0

表 5.3-32　　JLB1A，JLB1B 型铝包钢绞线结构和性能

规格号	面积（mm^2）	单线根数	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）		额定抗拉力（kN）		直流电阻（Ω/km）（20℃时）
			单线	绞线	JLB1A	JLB1B	JLB1A	JLB1B	
4	12	7	1.48	4.43	80.1	79.4	16.08	15.84	7.159 2
6.3	18.9	7	1.85	5.56	126.2	125.0	25.33	24.95	4.545 5
10	30	7	2.34	7.01	200.3	198.5	40.20	39.60	2.863 7
12.5	37.5	7	2.61	7.84	250.4	248.1	50.25	49.50	2.291 0
16	48	7	2.95	8.86	320.5	317.5	64.32	63.36	1.789 8

续表

规格号	面积 (mm^2)	单线根数	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）		额定抗拉力（kN）		直流电阻（Ω/km）（20℃时）
			单线	绞线	JLB1A	JLB1B	JLB1A	JLB1B	
25	75	7	3.69	11.08	500.7	496.2	93.75	99.00	1.145 5
40	120	7	4.67	14.02	801.2	793.9	132.0	158.4	0.715 9
40	120	19	2.84	14.18	805.0	797.7	160.8	158.4	0.719 4
63	189	19	3.56	17.79	1267.9	1256.4	240.0	249.5	0.456 8
100	300	37	3.21	22.49	2017.3	1999.0	402.0	396.0	0.288 4
125	375	37	3.59	25.15	2521.7	2498.7	476.3	495.0	0.230 7
160	480	37	4.06	28.45	3227.7	3198.3	580.8	633.6	0.180 3
200	600	37	4.54	31.81	4034.7	3997.9	684.0	792.0	0.144 2
200	600	61	3.54	31.85	4040.6	4003.8	762.0	792.0	0.144 4

表 5.3-33　　JLB2 型铝包钢绞线结构和性能

规格号	面　积 (mm^2)	单线根数	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）
			单　线	绞　线			
16	36.2	7	2.56	7.69	216.4	39.04	1.789 6
25	56.5	7	3.21	9.62	338.2	61.00	1.145 4
40	90.4	7	4.05	12.2	541.1	97.61	0.715 9
40	90.4	19	2.46	12.3	543.7	97.61	0.719 3
63	142	19	3.09	15.4	856.4	153.7	0.456 7
100	226	37	2.79	19.5	1362.6	244.0	0.288 4
125	282	37	3.12	21.8	1703.2	305.0	0.230 7
160	362	37	3.53	24.7	2180.1	390.4	0.180 3
200	452	37	3.94	27.6	2725.1	488.0	0.144 2
200	452	61	3.07	27.6	2729.1	488.0	0.144 4

表 5.3-34　　JG1A JG1B JG2A JG3A 型钢绞线结构和性能

规格号	面积 (mm^2)	单线根数	直径（mm）		单位长度质量（kg/km）	额定抗拉力（kN）				直流电阻（Ω/km）（20℃时）
			单线	绞线		JG1A	JG1B	JG2A	JG3A	
4	27.1	7	2.22	6.66	213.3	36.3	33.6	39.3	43.9	7.144 5
6.3	42.7	7	2.79	8.36	335.9	55.9	51.7	60.2	67.9	4.536 2
10	67.8	7	3.51	10.53	533.2	87.4	80.7	93.5	103.0	2.857 8
12.5	84.7	7	3.93	11.78	666.5	109.3	100.8	116.9	128.8	2.286 2
16	108.4	7	4.44	13.32	853.1	139.9	129.0	199.7	164.8	1.786 1
16	108.4	19	2.70	13.48	857.0	142.1	131.2	152.9	172.4	1.794 4
25	169.4	19	3.37	16.85	1339.1	218.6	201.6	238.9	262.6	1.148 4
40	271.1	19	4.26	21.31	2142.6	349.7	322.6	374.1	412.1	0.717 7
40	271.1	37	3.05	21.38	2148.1	349.7	322.6	382.3	420.2	0.719 6
63	427.0	37	3.83	26.83	3383.2	550.8	508.1	589.3	649.0	0.456 9

3.2　关于 GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》标准的补充文件

长期以来，国内用户对输电架空线路的设计，基本按照 GB 1179—1983《铝绞线、钢芯铝绞线及防腐钢芯铝绞线》标准和 GB 9329—1988《铝合金绞线及钢芯铝合金绞线》标准来选型，这二项标准的规格系列是以标称截面 mm^2 为数列，这与 GB/T 1179—1999 标准的规格号不同，为此提出了 GB/T 1179—1999 标准修改通知。修改单的内容本质与 GB 1179 和 GB 9329 标准一致，但规格号有所改变。因为修改单的规格号不能与 GB/T 1179—1999 的规格号重复，因此修改单的规格号数列带有小数，采用时须加注意。由于修改单的规格号与标称截面非常接近，使用者若用截面概念理解此规格号，一般不会产生错误。举例说：规格号 15.89 和 95.14，则可理解为 $16mm^2$ 和 $95mm^2$。

（1）铝绞线。JL 型铝绞线结构和性能见表 5.3-35。

（2）铝合金绞线。JLHA2 型和 JLHA1 型铝合金绞线结构和性能见表 5.3-36 和表 5.3-37。

（3）钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线。JL/G1A 型钢芯铝绞线、JLHA2/G1A 型和 JLHA1/G1A 型钢芯铝合金绞线的结构分别见表 5.3-38、表 5.3-39 和表 5.3-40。这些产品的额定抗拉力和直流电阻见表 5.3-41。

表 5.3-35　　**JL 型铝绞线结构和性能**

规格号	截面积 (mm²)	单线根数	直径 (mm)		单位长度质量 (kg/km)	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
			单线	绞线			
15.89	15.89	7	1.70	5.10	43.5	3.02	1.802 2
25.41	25.41	7	2.15	6.45	69.5	4.57	1.126 7
34.36	34.36	7	2.50	7.50	94.0	6.01	0.833 3
49.48	49.48	7	3.00	9.00	135.3	8.41	0.578 7
71.25	71.25	7	3.60	10.8	194.9	11.40	0.401 9
95.14	95.14	7	4.16	12.5	260.2	15.22	0.301 0
121.21	121.21	19	2.85	14.3	333.2	20.61	0.237 4
148.07	148.07	19	3.15	15.8	407.0	24.43	0.194 3
182.80	182.80	19	3.50	17.5	502.4	30.16	0.157 4
209.85	209.85	19	3.75	18.8	576.8	33.58	0.137 1
238.76	238.76	19	4.00	20.0	656.3	38.20	0.120 5
297.57	297.57	37	3.20	22.4	819.8	49.10	0.096 9
397.83	397.83	37	3.70	25.9	1096.0	63.65	0.072 5
502.90	502.90	37	4.16	29.1	1385.5	80.46	0.057 3
631.30	631.30	61	3.63	32.7	1741.8	101.01	0.045 8
805.36	805.36	61	4.10	36.9	2222.1	128.86	0.035 9

表 5.3-36　　**JLHA2 型铝合金绞线结构和性能**

规格号	截面积 (mm²)	单线根数	直径 (mm)		单位长度质量 (kg/km)	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
			单线	绞线			
8.71	10.02	7	1.35	4.05	27.4	2.96	3.289 1
13.97	16.08	7	1.71	5.13	44.0	4.74	2.050 0
21.67	24.94	7	2.13	6.39	68.2	7.36	1.321 3
30.33	34.91	7	2.52	7.56	95.5	10.30	0.943 9
43.57	50.14	7	3.02	9.06	137.2	14.79	0.657 3
60.88	70.07	7	3.57	10.7	191.7	20.67	0.470 3
82.67	95.14	7	4.16	12.5	261.5	28.07	0.348 1
104.58	120.36	19	2.84	14.2	330.8	35.51	0.275 1
130.29	149.96	19	3.17	15.9	412.2	44.24	0.220 8
160.65	184.90	19	3.52	17.6	508.2	54.54	0.179 1
182.33	209.85	19	3.75	18.8	576.8	61.91	0.157 8
208.49	239.96	19	4.01	20.1	661.1	70.79	0.138 3
260.17	299.43	37	3.21	22.5	825.0	88.33	0.110 9
347.53	399.98	37	3.71	26.0	1102.0	117.99	0.083 0
434.85	500.48	37	4.15	29.1	1380.9	147.64	0.066 4
548.51	631.30	61	3.63	32.7	1741.8	186.23	0.052 7
696.33	801.43	61	4.09	36.8	2211.3	236.42	0.041 5
869.36	1000.58	61	4.57	41.1	2760.7	295.17	0.033 2

表 5.3-37　　**JLHA1 型铝合金绞线结构和性能**

规格号	截面积 (mm²)	单线根数	直径 (mm)		单位长度质量 (kg/km)	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
			单线	绞线			
8.62	10.02	7	1.35	4.05	27.4	3.26	3.320 5
13.84	16.08	7	1.71	5.13	44.0	5.22	2.069 5
21.47	24.94	7	2.13	6.39	68.2	8.11	1.333 9
30.05	34.91	7	2.52	7.56	95.5	11.35	0.952 9
43.16	50.14	7	3.02	9.06	137.2	16.30	0.663 5
60.31	70.07	7	3.57	10.7	191.7	22.07	0.474 8
81.89	95.14	7	4.16	12.5	261.5	29.97	0.351 4
103.59	120.36	19	2.84	14.2	330.8	39.12	0.277 8
129.06	149.96	19	3.17	15.9	412.2	48.74	0.222 9
159.13	184.90	19	3.52	17.6	508.2	58.24	0.180 8
180.61	209.85	19	3.75	18.8	576.8	66.10	0.159 3
206.52	239.96	19	4.01	20.1	661.1	75.59	0.139 7
257.71	299.43	37	3.21	22.5	825.0	97.32	0.111 9
344.25	399.98	37	3.71	26.0	1102.0	125.99	0.083 8
430.74	500.48	37	4.15	29.1	1380.9	157.65	0.067 1
543.33	631.30	61	3.63	32.7	1741.8	198.86	0.053 2
689.76	801.43	61	4.09	36.8	2211.3	252.45	0.041 9
861.16	1000.58	61	4.57	41.1	2760.7	315.18	0.033 5

表 5.3-38 JL/G1A 型钢芯铝绞线结构和单位长度质量

规格号	钢比（%）	截面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	钢	总	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
10.60	17	10.60	1.77	12.37	6	1	1.50	1.50	1.50	4.50	42.8
16.13	17	16.13	2.69	18.82	6	1	1.85	1.85	1.85	5.55	65.1
25.36	17	25.36	4.23	29.59	6	1	2.32	2.32	2.32	6.96	102.4
34.86	17	34.86	5.81	40.67	6	1	2.72	2.72	2.72	8.16	140.8
48.25	17	48.25	8.04	56.30	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	194.8
50.73	58	50.73	29.59	80.32	12	7	2.32	2.32	6.96	11.6	371.1
68.05	17	68.05	11.34	79.39	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	274.8
69.73	58	69.73	40.67	110.40	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	510.2
94.39	16	94.39	15.33	109.73	26	7	2.15	2.15	5.01	13.6	380.2
95.14	20	95.14	18.82	113.96	7	7	4.16	4.16	5.55	13.9	408.2
96.51	58	96.51	56.30	152.81	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	706.1
118.89	6	118.89	6.61	125.50	18	1	2.90	2.90	2.90	14.5	378.5
115.67	16	115.67	18.82	134.49	26	7	2.38	1.85	5.55	15.1	466.1
122.48	20	122.48	24.25	146.73	7	7	4.72	2.10	6.30	15.7	525.7
122.15	58	122.15	71.25	193.40	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	893.7
144.76	6	144.76	8.04	152.80	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	460.9
145.68	13	145.68	18.82	164.50	24	7	2.78	1.85	5.55	16.7	548.5
148.86	16	148.86	24.25	173.11	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.1
147.26	23	147.26	34.36	181.62	30	7	2.50	2.50	7.50	17.5	675.0
183.22	6	183.22	10.18	193.40	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	583.3
187.03	13	187.03	24.25	211.28	24	7	3.15	2.10	6.30	18.9	704.9
181.34	16	181.34	29.59	210.93	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	731.4
184.73	23	184.73	43.10	227.83	30	7	2.80	2.80	8.40	19.6	846.7
204.14	16	204.14	11.34	215.48	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	649.9
209.02	23	209.02	27.10	236.12	24	7	3.33	2.22	6.66	20.0	787.8
211.73	16	211.73	34.36	246.09	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	852.5
209.24	23	209.24	48.82	258.06	30	7	2.98	2.98	8.94	20.9	959.0
244.29	13	244.29	31.67	275.96	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	920.7
238.84	16	238.84	38.90	277.74	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	962.8
241.27	23	241.27	56.30	297.57	30	7	3.20	3.20	9.60	22.4	1105.8
296.88	5	296.88	15.33	312.21	42	7	3.00	1.67	5.01	23.0	938.7
303.42	7	303.42	20.91	324.32	45	7	2.93	1.95	5.85	23.4	1000.8
306.21	9	306.21	27.10	333.31	48	7	2.85	2.22	6.66	23.8	1057.0
300.09	13	300.09	38.90	338.99	24	7	3.99	2.66	7.98	23.9	1131.0
299.54	16	299.54	48.82	348.37	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1207.7
305.36	23	305.36	71.25	376.61	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1399.6
406.40	5	406.40	20.91	427.31	42	7	3.51	1.95	5.85	26.9	1284.3
391.91	7	391.91	27.10	419.01	45	7	3.33	2.22	6.66	26.6	1293.5
390.88	9	390.88	34.36	425.24	48	7	3.22	2.50	7.50	26.8	1347.5
399.72	13	399.72	51.82	451.54	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1509.3
398.94	16	398.94	65.06	464.00	26	7	4.42	3.44	10.3	28.0	1608.7
407.75	23	407.75	93.27	501.02	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1856.7
497.01	7	497.01	34.36	531.37	45	7	3.75	2.50	7.50	30.0	1640.3
488.58	9	488.58	43.10	531.68	48	7	3.60	2.80	8.40	30.0	1685.5
501.88	13	501.88	65.06	566.94	54	7	3.44	3.44	10.3	31.0	1895.0
623.45	7	623.45	43.10	666.55	45	7	4.20	2.80	8.40	33.6	2057.6
639.92	9	639.92	56.30	696.22	48	7	4.12	3.20	9.60	34.3	2206.4
635.19	13	635.19	80.32	715.51	54	19	3.87	2.32	11.6	34.8	2384.7
814.30	7	814.30	56.30	870.60	45	7	4.80	3.20	9.60	38.4	2687.5
808.15	9	808.15	71.25	879.40	48	7	4.63	3.60	10.8	38.6	2787.6
795.17	13	795.17	100.88	896.05	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2987.8

表 5.3-39 JLHA2/G1A 型钢芯铝合金绞线结构和单位长度质量

规格号	钢比（%）	截面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
9.21	17	10.60	1.77	12.37	6	1	1.50	1.50	1.50	4.50	42.8
14.01	17	16.13	2.69	18.82	6	1	1.85	1.85	1.85	5.55	65.1
22.04	17	25.36	4.23	29.59	6	1	2.32	2.32	2.32	6.96	102.4
30.29	17	34.86	5.81	40.67	6	1	2.72	2.72	2.72	8.16	140.8
41.93	17	48.25	8.04	56.30	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	194.8
44.08	58	50.73	29.59	80.32	12	7	2.32	2.32	6.96	11.6	371.1
59.12	17	68.05	11.34	79.39	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	274.8
60.58	58	69.73	40.67	110.40	12	7	2.72	2.72	8.16	13.61	510.2
82.01	16	94.39	15.33	109.73	26	7	2.15	2.15	5.01	3.6	380.2
83.85	20	96.51	56.30	152.81	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	706.1
10.30	6	118.89	6.61	125.50	18	7	2.90	2.90	8.70	14.5	378.5
100.50	16	115.67	18.82	134.49	26	7	2.38	1.85	5.55	15.1	466.1
106.13	58	122.15	71.25	193.40	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	893.7
125.78	6	144.76	8.04	152.81	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	460.9
129.34	16	148.86	24.25	173.11	26	7	2.70	2.70	6.30	17.1	600.1
159.19	6	183.22	10.18	193.40	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	583.3
157.56	16	181.34	29.59	210.3	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	731.4
177.37	6	204.14	11.34	215.8	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	649.9
183.96	16	211.73	34.36	246.09	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	852.5
212.25	13	244.29	31.67	275.96	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	920.7
207.52	16	238.84	38.90	277.74	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	962.8
263.63	7	303.42	20.91	324.32	45	7	2.93	1.95	5.85	23.4	1000.8
260.26	16	299.54	48.82	348.37	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1207.7
265.32	23	305.36	71.25	376.61	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1399.6
340.52	7	391.91	27.10	419.01	45	7	3.33	2.22	6.66	26.6	1293.5
347.30	13	399.72	51.82	451.54	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1509.3
354.28	23	407.75	93.27	501.02	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1856.7
431.83	7	497.01	34.36	531.37	45	7	3.75	2.50	7.50	30.0	1640.3
436.06	13	501.88	65.06	566.94	54	7	3.44	3.44	10.3	31.0	1895.0
541.69	7	623.45	43.10	666.55	45	7	4.20	2.80	8.40	33.6	2057.6
551.89	13	635.19	80.32	715.51	54	19	3.87	2.32	11.6	34.8	2384.7
707.51	7	814.30	56.30	870.60	45	7	4.80	3.20	9.60	38.4	2687.5
690.89	13	795.17	100.88	896.05	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2987.8
870.84	4	1002.3	43.10	1045.4	72	7	4.21	2.80	8.40	42.1	3106.8
863.22	13	993.51	125.50	1119.0	54	19	4.84	2.90	14.5	43.5	3728.9

表 5.3-40 JLHA1/G1A 型钢芯铝合金绞线结构和单位长度质量

规格号	钢比（%）	截面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
9.13	17	10.60	1.77	12.37	6	1	1.50	1.50	1.50	4.50	42.8
13.88	17	16.13	2.69	18.82	6	1	1.85	1.85	1.85	5.55	65.1
21.83	17	25.36	4.23	29.59	6	1	2.32	2.32	2.32	6.96	102.4
30.01	17	34.86	5.81	40.67	6	1	2.72	2.72	2.72	8.16	140.8
41.53	17	48.25	8.04	56.30	6	1	3.20	3.20	3.20	9.60	194.8
43.66	58	50.73	29.59	80.32	12	7	2.32	2.32	6.96	11.6	371.1
58.57	17	68.05	11.34	79.39	6	1	3.80	3.80	3.80	11.4	274.8
60.01	58	69.73	40.67	110.40	12	7	2.72	2.72	8.16	13.6	510.2
81.24	16	94.39	15.33	109.73	26	7	2.15	1.67	5.01	13.6	380.2
83.06	20	96.51	56.30	152.81	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	706.1
102.33	6	118.89	6.61	125.50	18	1	2.90	2.90	8.70	14.5	378.5
99.55	16	115.67	18.82	134.49	26	7	2.38	1.85	5.55	15.1	466.1
105.13	58	122.15	71.25	193.40	12	7	3.60	3.60	10.8	18.0	893.7
124.59	6	144.76	8.04	152.81	18	1	3.20	3.20	3.20	16.0	460.9
128.12	16	148.86	24.25	173.11	26	7	2.70	2.10	6.30	17.1	600.1
157.69	6	183.22	10.18	193.40	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	583.3
156.07	16	181.34	29.59	210.93	26	7	2.98	2.32	6.96	18.9	731.4
175.70	6	204.14	11.34	215.48	18	1	3.80	3.80	3.80	19.0	649.9
182.22	16	211.73	34.36	246.09	26	7	3.22	2.50	7.50	20.4	852.5
210.25	13	244.29	31.67	275.96	24	7	3.60	2.40	7.20	21.6	920.7

续表

规格号	钢比（%）	截面积（mm²）			单线根数		单线直径（mm）		直径（mm）		单位长度质量（kg/km）
		铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线	
205.56	16	238.84	38.90	277.74	26	7	3.42	2.66	7.98	21.7	962.8
261.14	7	303.42	20.91	324.32	45	7	2.93	1.95	5.85	23.4	1000.8
257.80	16	299.54	48.82	348.37	26	7	3.83	2.98	8.94	24.3	1207.7
262.81	23	305.36	71.25	376.61	30	7	3.60	3.60	10.8	25.2	1399.6
337.30	7	391.91	27.10	419.01	45	7	3.33	2.22	6.66	26.6	1293.5
344.03	13	399.72	51.82	451.54	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1509.3
350.94	23	407.75	93.27	501.02	30	19	4.16	2.50	12.5	29.1	1856.7
427.76	7	497.01	34.36	531.37	45	7	3.75	2.50	7.50	30.0	1640.3
431.95	13	501.88	65.06	566.94	54	7	3.44	3.44	10.3	31.0	1895.0
536.58	7	623.45	43.10	666.55	45	7	4.20	2.80	8.40	33.6	2057.6
546.68	13	635.19	80.32	715.51	54	19	3.87	2.32	11.6	34.8	2384.7
700.83	7	814.30	56.30	870.60	45	7	4.80	3.20	9.60	38.4	2687.5
684.37	13	795.17	100.88	896.05	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2987.8
862.62	4	1002.3	43.10	1045.4	72	7	4.21	2.80	8.40	42.1	3106.8
855.08	13	993.51	125.50	1119.0	54	19	4.84	2.90	14.5	43.5	3728.9

表 5.3-41　JL/G1A JLHA2/G1A JLHA1/G1A 型绞线额定抗拉力和直流电阻

JL/G1A 型			JLHA2/G1A 型			JLHA1/G1A 型		
规格号	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）	规格号	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）	规格号	额定抗拉力（kN）	直流电阻（Ω/km）（20℃时）
10.60	4.14	2.706 2	9.21	5.20	3.114 7	9.13	5.51	3.144 4
16.13	6.13	1.779 1	14.01	7.90	2.047 6	13.88	8.39	2.067 1
25.36	9.26	1.131 3	22.04	12.30	1.302 0	21.83	13.06	1.314 4
34.86	12.55	0.823 0	30.29	16.91	0.947 2	30.01	17.96	0.956 3
48.25	16.81	0.594 6	41.93	23.08	0.684 4	41.53	24.53	0.690 9
50.73	42.61	0.569 3	44.08	48.70	0.655 2	43.66	50.22	0.661 4
*68.05	23.36	0.421 7	59.12	32.55	0.485 3	58.57	33.91	0.489 9
69.73	58.22	0.414 1	60.58	66.94	0.476 6	60.01	69.03	0.481 2
94.39	34.93	0.305 9	82.01	45.79	0.352 1	81.24	48.62	0.355 4
95.14	37.24	0.302 0	83.85	90.40	0.344 4	83.06	93.29	0.347 7
96.51	77.85	0.299 2	10.30	42.60	0.278 8	102.33	46.17	0.281 5
118.89	27.74	0.242 2	100.50	56.14	0.287 3	99.55	59.61	0.290 0
115.67	42.26	0.249 6	106.13	114.41	0.272 1	105.13	116.85	0.274 7
122.48	47.96	0.234 6	125.78	51.55	0.229 0	124.59	55.90	0.231 2
122.15	97.92	0.236 4	129.34	72.28	0.223 2	128.12	76.75	0.225 4
144.76	32.7	0.199 0	159.19	65.25	0.180 9	157.69	68.91	0.182 6
145.68	46.78	0.198 1	157.56	87.23	0.183 3	156.07	92.67	0.185 0
148.86	53.67	0.194 0	177.37	72.70	0.162 4	175.70	76.78	0.163 9
147.26	64.94	0.196 2	183.96	101.63	0.157 0	182.22	107.98	0.158 5
183.22	40.51	0.157 2	212.25	108.17	0.135 9	210.25	113.05	0.137 2
187.03	59.23	0.154 3	207.52	114.81	0.139 1	205.56	121.97	0.140 5
181.34	64.56	0.159 2	263.63	113.97	0.109 6	261.14	123.07	0.110 6
184.73	80.54	0.156 4	260.26	144.02	0.110 9	257.80	150.01	0.112 0
204.14	45.14	0.141 1	265.32	168.46	0.108 9	262.81	174.57	0.109 9
209.02	66.19	0.138 0	340.52	147.32	0.084 9	337.30	159.07	0.085 7
211.73	74.11	0.136 4	347.30	174.92	0.083 3	344.03	186.91	0.084 1
209.24	91.23	0.138 1	354.28	226.61	0.081 6	350.94	234.77	0.082 3
244.29	75.19	0.118 1	431.83	185.79	0.066 9	427.76	195.73	0.067 5
238.84	83.76	0.120 9	436.06	219.62	0.066 3	431.95	234.68	0.067 0
241.27	101.74	0.119 8	541.69	233.05	0.053 3	536.58	245.52	0.053 8
296.88	68.41	0.097 3	551.89	278.95	0.052 4	546.68	291.65	0.052 9
303.42	76.04	0.095 2	707.51	302.15	0.040 8	700.83	318.43	0.041 2
306.21	83.76	0.094 4	690.89	349.57	0.041 9	684.37	365.48	0.042 3
300.09	92.36	0.096 1	870.84	344.81	0.033 2	862.62	364.85	0.033 5
299.54	103.58	0.096 4	863.22	436.16	0.033 5	855.08	456.03	0.033 8
305.36	127.23	0.094 6						
406.40	89.48	0.071 0						
391.91	96.37	0.073 7	—	—	—	—	—	—
390.88	103.67	0.073 9						
399.72	122.95	0.072 4						

续表

JL/G1A 型			JLHA2/G1A 型			JLHA1/G1A 型		
规格号	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）	规格号	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）	规格号	额定抗拉力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
398.94	135.39	0.072 4						
407.75	171.56	0.070 9						
497.01	118.69	0.058 1	—	—	—	—	—	—
488.58	127.31	0.059 1						
501.88	154.37	0.057 6						
623.45	148.89	0.046 3						
639.92	164.31	0.045 2						
635.19	193.19	0.045 5	—	—	—	—	—	—
814.30	192.22	0.035 5						
808.15	207.68	0.035 8						
795.17	242.23	0.036 4						

3.3　型线同心绞架空导线

型线同心绞架空导线等同采用 IEC 62219：2002《型线同心绞架空导线》标准。型线同心绞架空导线可用 3 种生产工艺：第 1 种是单线在前一道工艺过程中被拉制成型，绞合是在后一道工艺过程进行；第 2 种工艺是单线成型和单线绞合在一次操作中完成；第 3 种是先绞合一层圆单线，然后将此层紧压成圆形截面，圆形单线的其他层可被绞合并紧压，这是一种分层绞合兼紧压方法，也可将成型单线分层直接在紧压的芯线上，型线不需再紧压。在任何情况下，该导线的材料都应符合 GB/T 17048 或 JB/T 8134 要求。第 1 种情况的试验应在绞合前的成型单线上进行，且其性能应基于等效线径进行计算。后 2 种情况的试验应在成型和绞合前的圆形单线上进行，且其性能应基于成型之前的圆形单线直径进行计算。型线同心绞架空导线的产品名称和型号见表 5.3-42。成品型式见图 5.3-5、图 5.3-6 和图 5.3-7。表 5.3-43 和表 5.3-44 为 JLX 和 JLX/G1A 导线的特性举例。

表 5.3-42　　型线同心绞架空导线型号和名称

产品名称	国标型号
成型铝绞线	JLX
成型铝合金绞线	JLHA2X、JLHA1X
钢芯成型铝绞线	JLX/G1A、JLX/G1B、JLX/G2A、JLX/G2B
钢芯成型铝合金绞线	JLHA2X/G1A、JLHA2X/G1B、JLHA2X/G2A、JLHA2X/G2B、JLHA1X/G1A、JLHA1X/G1B、JLHA1X/G2A、JLHA1X/G2B
铝芯成型铝绞线	JLX/L
铝合金芯成型铝绞线	JLX/LHA2、JLX/LHA1
铝包钢芯成型铝绞线	JLX/LB
铝包钢芯成型铝合金绞线	JLHA2X/LB、JLHA1X/LB

表 5.3-43　　JLX 型导线的特性举例

代　码	面　积 (mm^2)	直　径 (mm)	单位长度重量 (kg/m)	计算拉断力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)(20℃时)
100	100	12.16	0.275	17.5	0.287 3
125	125	13.42	0.344	21.3	0.229 9
160	160	15.01	0.439	27.2	0.179 6
200	200	16.65	0.550	33	0.143 7
250	250	18.49	0.688	41.3	0.114 9
315	315	20.65	0.866	52	0.091 2
400	400	23.57	1.105	66	0.072 2
450	450	24.91	1.244	74.3	0.064 2
500	500	26.20	1.383	82.5	0.057 8
560	560	27.62	1.548	92.4	0.051 6
630	630	29.23	1.742	100.8	0.045 9
710	710	31.11	1.964	115.5	0.040 7
800	800	32.97	2.212	128	0.036 1
900	900	35.06	2.495	148.5	0.032 2
1000	1000	36.87	2.772	160	0.029 0

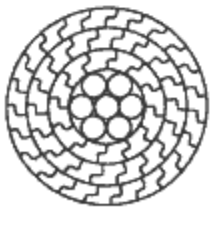


图 5.3-5　O 和 Z 形混合绞



图 5.3-6　圆和拱形混合绞

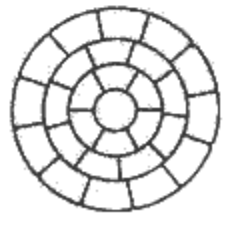


图 5.3-7　全拱形绞

表 5.3-44 JLX/G1A 型导线的特性举例

代码	截面积 (mm²)	钢线		导线直径 (mm)	单位长度质量			计算拉断力 (kN)	直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
		根数	直径 (mm)		铝 (kg/km)	钢 (kg/km)	总和 (kg/km)		
100/17	100	1	4.61	12.0	274	130	404	34.8	0.285 5
125/7.5	125	1	3.09	13.5	342	59	401	28.9	0.228 4
160/10	160	1	3.49	15.3	441	75	516	37	0.179 8
208/28	208	7	2.25	18.3	576	217	793	66.9	0.138 3
250/32	250	7	2.43	19.9	690	255	945	78.3	0.115 3
300/39	300.5	7	2.67	21.8	831	307	1139	94.4	0.096 1
370/48	370.9	7	2.96	24.1	1026	377	1403	114	0.077 7
400/52	400	7	3.07	25.1	1104	407	1511	121	0.072 1
456/59	456	7	3.28	26.7	1259	463	1722	138	0.063 2
505/65	505.3	7	3.45	28.1	1395	513	1908	153	0.057 1
593/77	593.5	7	3.74	31.2	1646	602	2248	185	0.048 8
622/153	622.5	19	3.20	34.0	1834	1198	3032	276	0.043 7
710/114	710	19	2.76	34.1	1976	894	2870	246	0.041 0
731/77	731.5	19	2.27	34.0	2032	603	2635	210	0.036 7
800/128	800	19	2.93	36.2	2226	1007	3233	275	0.036 3
902/74	901.9	19	2.22	36.1	2518	579	3097	235	0.032 3
975/167	974.9	19	3.34	40.6	2728	1308	4036	345	0.030 0
1000/130	1000	19	2.95	39.8	2779	1023	3802	308	0.029 0
1092/89	1092.5	19	2.44	40.6	3046	701	3747	280	0.026 7

3.4 其他架空导线、地线

为适应输配电架空导线的特殊要求，在结构和功能上开发了一些特种导线，如扩径导线、自阻尼导线、防冰雪导线、倍容量导线和光纤复合架空地线等。

3.4.1 扩径导线

扩大导线直径可减小表面电晕损耗。一种扩径方法是在绞线的中间几层用稀疏单线绞合，见图5.3-8，型号为 LGJK。另一种方法是用中心支撑构件，如波纹铝管、蛇皮管等，图 5.3-4 中心黑圈为支撑构件，型号为 LGKK。2 种扩径导线主要结构、规格和性能见表 5.3-45 和表 5.3-46。用于 750kV 输电线路的扩经导线试制品的结构和性能参见表 5.3-47。该表摘自《西北电网 750kV 输变电工程用扩径导线研究》，作者毛庆传等人，发表于 2004 年中国国际线缆及线材学术研讨会（有色金属）论文集。

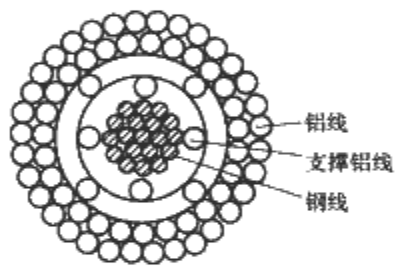


图 5.3-8 扩大直径导线

表 5.3-45 LGJK 型导线结构和性能

项目	单位	标称截面 (mm²)				
		630	800	1000	1250	1400
导线外径	mm	48	49	51	52	51
计算截面积：铝	mm²	535.43	613.24	1001.40	1259.14	1399.6
钢		152.81	152.81	152.81	152.81	134.3
总		788.24	966.23	1154.21	1411.95	1533.9
结构：中心钢线	根数/mm	19/3.2	19/3.2	19/3.2	19/3.2	19/3.0
第1层铝（支撑层）		4/4.55	4/4.50	4/4.35	4/4.60	13/4.5
第2层铝（支撑层）		4/4.55	4/4.60	4/4.55	18/4.47	19/4.5
第3层铝		11/3.70	24/3.80	27/4.30	26/4.47	25/4.5
第4层铝		36/3.70	36/3.80	33/4.30	32/4.47	31/4.5
计算总拉断力	kN	228	253	278	313	329
弹性系数	kN/mm²	67.8	64.2	61.5	58.0	53.6

续表

项目	单位	标称截面 (mm²)				
		630	800	1000	1250	1400
线胀系数	10^{-6}℃$^{-1}$	15.5	16.2	17.7	21.5	20.4
直流电阻（20℃）	Ω/km	0.046 433	0.036 179	0.029 314	0.023 161	0.021 330
载流量（导体 70℃）	A	815	904	1000	1147	1160
单位长度质量	kg/km	2994	3491	4013	4713	4962

表 5.3-46 LGKK 型导线结构和性能

项目	单位	标称截面 (mm²)		
		587	900	1400
导线外径	mm	51	49	57
计算截面积：铝	mm²	586.7	906.4	1387.8
钢		49.5	84.83	106.00
总		636.2	991.23	1493.8
结构：中心支撑软管外径	根数/mm	39	27	27
第1层钢铝混绞		钢 7/3.0+铝 35/3.0	钢 12/3.0+铝 18/3.0	钢 15/3.0+铝 15/3.0
第2层铝		48/3.0	28/4.0	28/4.0
第3层铝		—	34/4.0	34/4.0
第4层铝		—	—	40/4.0
计算总拉断力	kN	137	205	289
弹性系数	kN/mm²	71.54	58.7	58.02
线胀系数	10^{-6}/℃	20.6	20.4	20.8
直流电阻（20℃）	Ω/km	0.051 4	0.033 17	0.021 63
载流量（导体 70℃）	A	750	1020	1290
单位长度质量	kg/km	2711	3650	5159

表 5.3-47 750kV 扩径导线试制品技术参数（型号 LGJK—300/50）

名称		技术参数
根数/直径 (mm)	钢芯	7/3.07±0.05
	铝芯	(24+10+7)/3.07±1%
计算截面积 (mm²)	钢	51.8
	铝	303.4
	总和	355.2±2.0%

续表

名　称		技术参数
铝钢比		5.86
成品绞线外径（mm）		27.63±1%
总拉断力（最小值）（kN）		115.0
拉力重量比（最小值）		9.0
计算重量（总）（kg/km）		1243.9±2%
弹性系数/10^3（MPa）		76.8±3.0
线膨胀系数$\times10^{-6}$　（$℃^{-1}$）		18.7
20℃时直流电阻≤　（Ω/km）		0.095 33
绞向（最外层）		右向
计算载流量（A）（导体温度 70℃）	环境温度 35℃	590
	环境温度 40℃	520
接头	铝线接头间距≥（m）	15
	铝线接头数量	制造长度内外层不允许接头
	镀锌钢线	不允许接头

交货长度（以工程供货要求为准）：每盘规定装一根成品导线，长度为 2500m+1%，允许占总量 5%数量的短段交货，但短段导线长度不短于 1250m

注　本表仅是 750kV 扩径导线试制品，在以后进入实用阶段，其结构和参数会有调整。

3.4.2　自阻尼导线

架空导线在受力状态下，因风力激励而可能产生强烈振动，导致发生导线断股、断线等严重事故。自阻尼导线采用型线绞合，但在铝线和钢芯之间留有 0.6～1.0mm 的间隙，钢芯和铝线层分别形成独立部分，具有不同的自振频率，在风振状态下造成二者振动幅度不同，因而产生相互撞击，自动消耗风力的激励能量，从而减少微风引起的振动，也不致产生大幅度舞动而避免事故。使用自阻尼导线，也可加大塔杆间距或降低塔杆高度，从而降低设计制造成本。自阻尼导线的绞合状态见图 5.3-9 。

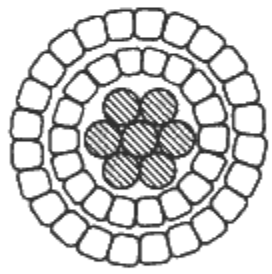


图 5.3-9　自阻尼导线

3.4.3　防冰雪导线

输电线路上如覆冰过重或积雪过多，就可能发生断线或倒杆的重大事故，造成巨大的经济损失。所以在重冰区的输电线路上最好采用防冰雪导线。研发的防冰雪导线有防雪环式、低居里合金式、涂料防冰式等多种。防雪环由聚碳酸酯塑料制成，状如指环。套装在导线上，指环间距约为线股节距的 2 倍。可使积雪在沿导线滑动时受阻而脱落。低居里点合金是一种镍-铬-硅-铁四元合金，在温度 0～20℃时能产生磁性，将这种线嵌绞在导线中，在覆冰时能产生涡流发热而融冰。涂料防冰式导线是将憎冰性涂料涂在导线上，能减小冰对导线的附着力，使冰易于脱落。此外有一种带翼式防冰雪导线，将两根翼形导线对称嵌绞在外层，它的防雪原理与防雪环基本相似。

3.4.4　倍容量导线

倍容量导线由特耐热铝合金线与铝包高强度殷钢线组合绞制而成。长期使用温度在 150℃以下，但允许达 230℃，短路温度 290℃。与普通钢芯铝绞线相比，在外径及单位重量相当的情况下，其载流量约提高 1 倍。由于这种结构的价格较高，线路损耗也较大，一般仅在大跨越或需要增容的线路上采用。倍容量导线的计算载流量见表 5.3-48。铝包高强度殷钢线在 230℃以下的线胀系数为$3.3\times10^{-6}/℃$。

表 5.3-48　　倍容量导线载流量参考值

标称截面（mm^2）	160	240	320	400	600
载流量计算值（A）	931	1223	1479	1724	2250

3.4.5　钢芯软铝绞线

钢芯软铝绞线由软铝线与钢芯组合绞制而成，其结构形式上没有多大改变。其特点是：在运行过程中若超过应力转移温度以上时，软铝线处于松弛状态，其机械负荷可以认为全由钢芯承担；正常运行温度可高达 160℃，载流量可提高近 1 倍，而弧垂并不明显增大，比较适合于需要改建增大容量的线路。这种导线的自阻尼性能也较好，一般设计铝导体线截面为 240～480mm^2，架设线路时需有特殊预拉力措施。

3.4.6　500kV 超高压架空线用钢芯铝绞线

为三峡电站送电工程的 500kV 线路用的钢芯铝绞线用硬铝线和镀锌钢线绞成，型号为 ACSR-720/50，实质上与 LGJ 含义相似，但其规格却是特定的，并对接头有严格规定。ACSR-720/50 产品结构和技术参数见表 5.3-49，这些数据摘自电线电缆产品手册（上海电缆研究所组编，机械工业出版社 2004 年 11 月出版）。这种导线已被其他 500kV 线路广泛采用，并成为一种典型结构。

表 5.3-49　　ACSR-720/50 钢芯铝绞线结构和技术参数

名　称		技术参数
根数×直径（mm）	钢芯	7×3.02
	铝芯	45×4.53
计算截面积（mm^2）	钢	50.14
	铝	725.27
	总和	775.41±2.0%
综合拉断力（最小值）（kN）		170.6
铝钢比		14
外径（mm）	成品绞线	36.24±1%
	钢芯	9.06±1%
单位长度质量（kg/km）	铝	2003.4±1%
	钢	392.5±2%
	总	2397.7±2%
弹性系数/10^3（MPa）		63.7±3.0
线膨胀系数（$10^{-6}℃^{-1}$）		20.8
直流电阻（Ω/km）（20℃时）		0.039 64～0.039 84
绞向（最外层）		右向
振动疲劳		3×10^7次不断裂

导线绞合节径比：钢芯（6 根层）18～22。铝线外层 10～12，中层 10～14，内层 13～16

3.4.7　间隙式架空导线

间隙式架空导线与自阻尼导线有些相似，其中心为高强度镀锌钢线绞合的钢芯，钢芯外绞制耐热拱形铝合金线，但二者之间留有间隙，间隙内充实耐高温硅脂，拱形线外再绞圆形耐热铝合金线。其工作温度达 150℃，与一般架空导线比较，载流量约提高到 1.6 倍，并具有阻尼性能，该产品日本已有应用。间隙式架空导线结构和性能见表 5.3-50（摘自

王春江主编电线电缆手册第一册 第2版)。

表 5.3-50 间隙式架空导线结构和性能

项目	单位	标称截面 (mm^2)					
		170	200	260	350	410	640
结构：圆铝合金线	根/mm	—	18/2.90	19/3.15	16/4.10	18/4.0	38/4.10
拱形铝合金线		12	12	12	10	10	10
特强钢线		7/2.60	7/2.90	7/3.20	7/3.10	7/3.50	7/3.10
间隙		1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
外径：铝合金	mm	18.2	20.3	23.1	26.0	28.0	34.2
钢芯		7.8	8.7	9.6	9.3	10.5	9.8
计算截面：铝合金	mm^2	171.0	195.6	261.3	352.4	409.1	642.7
钢芯		37.16	46.24	56.3	52.8	67.35	52.8
单位重量	kg/km	789	930	1198	1418	1695	2226
拉断力：成品绞线	kN	86.2	102.4	127.4	134.3	165.9	176.4
钢芯		59.0	73.6	89.6	84.0	106.9	84.0
最大直流电阻（20℃）	Ω/km	0.172	0.150	0.113	0.083 7	0.072 1	0.045 4
弹性模量	GPa	205.9	205.9	205.9	205.9	205.9	205.9
线胀系数	10^{-6} ℃$^{-1}$	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
载流量（导体150℃）	A	735	880	980	1190	1330	1755

3.4.8 光纤复合架空地线

光纤复合架空地线（OPGW）由通信用光纤置于铝管或不锈钢管中组成的光单元与铝包钢线或铝合金线组合绞制而成，具有防雷保护和通信两种功能。光纤具有信息容量大、传输衰减小、不受电和磁干扰及使用安全可靠等优点，能适应电力系统中遥控、遥测和大容量信息传输的需要。光纤绞线的原则与一般架空导线基本相同，光纤的结构设计和传输特性参见本篇第6章通信光缆。光纤复合架空地线的设计应符合线路运行要求，一般需经受－40～＋65℃热循环试验，有的需经受－30～＋150℃热循环试验、甚至连续150℃的高温试验，有的需经受300℃短时热冲击试验。经受试验后，光纤衰减变化应在0.03～0.05 dB/km以下。

3.4.9 复合材料加强芯铝绞线

芳纶纤维、碳纤维或玻璃纤维与树脂制成的纤维复合增强塑料构件（FRP）在电缆行业中广泛应用，最近架空导线也开始研究发展FRP的应用。复合材料加强芯铝绞线（ACCC）与传统的钢芯铝绞线相比，它具有比强度大、重量轻、耐高温，耐腐蚀，体胀系数小（弛度亦小）的优点，在可比对条件下，当增加28%的铝导体截面时，有可能提高整体容量1倍和铁塔数量可减少20%。美国某公司的第一条ACCC商用试验线路建设在犹大洲盐湖城，输电线路长度为22mile（1mile＝1609.3m），电压等级为138 kV。该工程总投资80万美元，于2005年9月开始施工，2006年投入运行。该公司与我国某厂也联合试制了18.6英里ACCC样品，准备提供国内挂网试运行。据报导用型线组成的自阻尼ACCC在法国某公司的实验室通过了自阻尼性能调试，其性能要比传统钢芯铝绞线更优越。

ACCC也能制成倍容量导线，因为它的耐热性高，弧垂小且其变化很小。在架设时将复合加强芯先张紧（即采用张力放线），使外绞的铝线不承受拉力，这样就可以用62% IACS以上导电率的软铝绞线，工作温度可提高到120～150℃。复层同心圆筒的导线组合结构会自然获得自身谐振频率的变化而达到自阻尼效果。这种导线的推广需要在线路设计、架设施工和维护等方面的技术配合。

4 架空导线的试验

20世纪50年代，架空导线处于发展时期，有必要进行很多研究性试验，尤其对铝合金单线和绞线的耐热、蠕变、耐疲劳和电导率等性能，积累了很多经验。现在架空导线技术成熟，常规产品的试验项目比过去简明得多，其成品应按GB/T 1179—1999《圆线同心绞架空导线》和IEC 62219—2002《型线同心绞架空导线》规定进行试验。值得注意的是标准中强调对绞合前各类金属单线的试验应按其相应标准进行，包括单线接头试验等，这些均属抽样和型式试验内容，应严格遵守抽样规则，以保证质量，工艺上应控制单线及其接头的质量和规定的接头数量。光纤复合架空地线是近期发展的产品，结构和功能特殊，因此试验项目较多，应按照JB/T 8999—1999或DL/T 832—2003或GB/T 7424.4—2003《光纤复合架空地线》标准的规定进行，可以看出标准中规定的大部分试验是为了考核光纤传输性能的变化。

架空导线试验分型式试验和抽样试验，实际上例行试验只有检验表面质量一项。型式试验是为了证实架空导线的设计性能，当架空导线中所用材料或某些单元（如光单元）更换时，才需要进行全部或有选择的部分试验。由于圆线同心绞架空导线和光纤复合架空地线（OPGW）功能的特殊性，其型式试验的具体项目和每项试验的合格判据大多由用户和制造商共同协商确定，这一点在上述诸《光纤复合架空地线》标准中均有说明，型式试验应在抽样试验全部合格的样品上进行。抽样试验是为了保证每批产品的质量满足标准要求所进行的试验。成品的抽样试验用样品应从10%成盘导线的外端随机选取。此外每盘导线的表面质量状况和OPGW每根光纤的衰减都应100%检查。

4.1 试验项目

OPGW试验项目见表5.3-51，20多年来，OPGW制造技术也逐步完善化，其试验项目也趋向简单化。但需要说明以下几点：

表 5.3-51 试 验 项 目 简 略 表

序号	圆线同心绞架空导线		光纤复合架空地线（OPGW）	
	型式试验	抽样试验（一般抽10%）	型式试验	抽样试验（一般抽10%）
1	铝单线的接头	绞合前单线直径	光纤性能试验	成品光纤的光衰减100%检验
2	应力—应变曲线	绞合前单线性能（按相应标准）	应力－应变试验	光单元尺寸，抗拉，伸率，电阻
3	导线拉断力	导线根数	抗拉性能试验	绞合前单线直径
4		绞线直径	滑轮试验	绞合前单线性能（按相应标准）
5		截面积	微风振动试验	成品直径
6		线密度	舞动试验	截面积
7		节径比及绞向	蠕变试验	单位长度重量
8		表面状况（100%检验）	温度循环试验	绞合节距
9			渗水试验	外层绞合方向
10			短路试验	用户要求时进行抗拉力试验
11			雷击试验	每盘成品表面质量100%检验

（1）光纤的型式试验应符合 GB/T 8401.1—1987《光纤的传输特性和光学特性测试方法》总则、GB/T 8402.1—1995《光纤的（几何）尺寸参数测量方法》总则、GB/T 8403.1—1987《光纤的机械性能试验方法》总则和 GB/T 8404.1—1987《光纤的环境性能试验方法》总则的有关要求。至于光纤的具体性能指标，应参考光纤的有关标准。

（2）光纤的光衰减应 100% 试验。光纤其他光学特性的抽样试验项目和抽检率，由供需双方协商确定。

（3）在 OPGW 的结构设计时，若整个 OPGW 电阻和额定拉断力值的计算中包括光单元，则光单元应对其铝管或其他保护材料或骨架材料的机械和电气性能进行抽样试验。试验项目包括结构尺寸、抗拉强度、伸长率和电阻，抽检率为 10%。若 OPGW 电阻和额定拉断力值的计算中不包括光单元，换言说即光单元考虑不受张力，则只需检验结构尺寸。

4.2 光纤复合架空地线的部分型式试验方法简述

OPGW 的型式试验方法可参考 JB/T 8999—1999 或 DL/T 832—2003 或 GB/T 7424.4—2003《光纤复合架空地线》标准的附录，并有试验示意图，本文仅简略叙述部分试验原则。

（1）应力—应变试验。应力—应变试验用以确定在负荷情况下的机械性能。试样长度应大于 10m（由供需双方协商，也可采用其他长度样品）。终端夹具可采用预绞丝、压接管或需方同意使用的环氧树脂型或焊接型等，在试验过程中应对 OPGW 无明显损伤。试验中得到的所有应力和应变值应列成表格。当要求进行 OPGW 的抗拉强度试验时，OPGW 应承受不小于 95%的额定拉断力而无任何单线破断。

（2）抗拉性能试验。抗拉性能试验用以确定光单元在受到拉力时的下列性能：①光衰减变化性能；②光纤应变；③应变限量。其中光纤应变和应变限量测试只适用于松套管结构。试验应力下的 OPGW 试样长度至少为 10m（由供需双方协商，也可采用其他长度样品）。进行光纤衰减测试的光纤样品应不小于 100m，进行光纤应变的测试长度不小于 30m。光纤衰减应采用连接在试验光纤一端的光功率计测试，也可采用光时域反射计（OTDR）测试，但试验光纤的最小长度由光时域反射计（OTD）的特性确定。可用预绞丝或合适的终端夹具处理试样，在光纤产生应变之前，光单元组件相对于 OPGW 应不产生位移。

试验完成后，应判定：①OPGW 的永久或短暂光衰减变化到大于 MAT（最大允许拉力）负荷下的规定值，应判为不合格；②应变限量小于对应于 MAT 下的规定值，应判为不合格。

（3）滑轮试验。滑轮试验是模拟 OPGW 架设时的受力情况，通过试验来证明在安装架设时 OPGW 不会受损害或降低其性能。试样通过一组滑轮相对移动，试样在有张力的情况下会产生弯曲和拉直，此时可测量光纤性能。试验完成后，应判定：

1）任何永久光衰减变化大于规定值，应判为不合格。

2）光单元的 MOAC 任何百分比变化大于最大允许椭圆度，应判为不合格。另外，应无削弱 OPGW 性能的损伤。

（4）微风振动试验。微风振动试验用以评定 OPGW 的疲劳性能和光纤在典型微风振动下的光学特性。试验完成后，应判定：

1）任何永久或短暂光衰减变化大于规定值，应判为不合格。

2）光单元的 MOAC 任何百分比变化大于最大允许椭圆度，应判不合格。

3）绞线的任何机械损伤如松股呈灯笼状、断线等均应判为不合格。

（5）舞动试验（在研究中）。舞动试验用以测定 OPGW 的疲劳性能和光纤在典型舞动状态下的光学特性。试验完成后，应判定：

1）任何永久或短暂光衰减变化大于规定值，应判为不合格。

2）光单元的 MOAC 任何百分比变化大于最大允许椭圆度，应判为不合格。

3）绞线的任何机械损伤如灯笼状、断线等均应判为不合格。

（6）短路试验。短路试验用以评定在典型短路条件下 OPGW 的性能和光纤的光学特性，短路时导线温度瞬间升高，考核光纤的二次被覆材料的稳定性和导体的耐热性。短路试验完成后，下一步的判定项目有：

1）光纤衰减。

2）试样经受拉力试验，以确定其拉断力。

3）应承受不小 95 % RTS 的拉力而无任何单线破断。

第4章 绕 组 线

绕组线是一种具有绝缘层的导电金属线、用以绕制电工产品的线圈或绕组，其作用是实现电能和磁能的相互转换，所以又被称为电磁线。早期绕组线的匝间电压较低，近年来为适应电器或电机的需要，匝间电压可达到数百伏特或以上。绕组线的导电线芯有圆铜线、扁铜线、绞线、束线、带、箔等。导体材料大多数采用软铜线，也可以用半硬铜线，有一部分采用铝线或其他金属线。

仪表线圈和低压电机用绕组线的匝间电压低，采用漆包线即可满足要求。高压电机等用绕组线的匝间电压较高，需考虑足够的耐电压水平。长期以来将绕组线产品分为4类，即漆包线、绕包线、无机绝缘绕组线和特种绕组线，这只是多年来的习惯而已。随着近代大型电机的发展，上述4类绕组线已不能满足设计要求，因此发展了绕组电缆，其用途当然是制作绕组，但该产品不能称为绕组线，因为其结构设计相当于中、高压电力电缆，它的制造工艺几乎与电力电缆相同。磁悬浮列车用长定子绕组电缆已进入商品范畴，其工作电压达20kV，甚至更高。再如正在研发中的高压发电机绕组电缆，其工作电压超过150kV。这类绕组电缆的试验不但覆盖了电力电缆的全部型式试验，而且附加了某些为制作绕组所要求的特殊试验项目。总之不论那一种绕组线和绕组电缆，其试验项目总是随电机、电器以及各种元件的设计要求而确定。

绕组线的导体尺寸和外形尺寸是很重要的参数，尺寸偏差会影响制造绕组和线圈的结构，其温度指数或耐温等级必须符合电机和电器设计要求，目前国际上大量应用F级绝缘，国内因成本问题，仍大量用E级绝缘，至于A级绝缘实际上已经淘汰。

当前已经发布并实施多年的各系列绕组线标准（主要是GB、GB/T、JB和JB/T）是本章编制内容的基本依据，但这些标准大多发布年份较早，目前正在修订或重新制定之中，暂时还不能正式发布和试行。好在修订或重新制定的标准在实质性内容方面并未作原则性的改动，而是进一步发展品种或结构改进，它们的主导方向将在有关章节中适当叙述，以便于读者了解发展趋向。

1 绕组线的结构

绕组线基本上不是独立使用的产品，可认为是制造电机、电器和元件等的材料，所以大多数绕组线结构由导体和绝缘二部分组成，一部分品种因后续工艺或使用场合的需要而具有护套。绕组线的导体材料主要为铜，少部分为铝，也有复合金属（如铜包铝）以及特殊设计的合金线。导体的形状分实心圆线和扁线，也有少量加工成空心扁线，用于水冷或气冷大容量发电机组。另有些导体根据电机或变压器绕组设计要求或用途差异，可采用绞线或平行换位漆包扁线。高频线圈则常用束绞漆包线。

绕组线绝缘材料和工艺的不同，可大致分成以下几种加工方式，即漆包线、绕包线、挤包线和无几绝缘线。漆包线和绕包线的品种复杂、规格很多，挤包绝缘线品种较少，规格也较少，无机绝缘绕组线总的使用量更少。虽然近期发展了电压较高的绕组电缆，但因制造工艺复杂，试验要求严酷，仅属于特殊产品，目前并不属于绕组线范畴。

1.1 绕组线的导体

GB/T 6108.1～6108.3—2003《绕组线基本尺寸》标准是等同采用IEC 60182.1—1984、IEC 60182.2—1987和IEC 60182.3—1972标准制定的，该标准规定了适用于绕组线的铜、铝及其他合金导体的规格尺寸和有关技术要求，GB/T 6108.1～6108.3—2003《绕组线基本尺寸》标准发布后替代了GB/T 6108.1～6108.3—1985《绕组线导体》标准。

(1) 绕组线圆导体尺寸。圆导体标称直径为0.125mm及以下的采用R_{20}数系，直径大于0.125mm的采用R_{40}数系。导体不圆度f值是同一截面上最大直径测量值与最小直径测量值之差。GB/T 6108.2—1985曾规定f值应不大于表5.4-1中标称直径与最大直径（和最小直径）之差的绝对值（mm），2003版修订标准则未加规定。导体直径的测量应按GB 4074.2—1983《漆包线试验方法》标准规定进行。各类绕组线的圆导体，可根据产品实际需要在表5.4-1的范围内选取一段。由于绕组的技术快速发展，为适应某些产品实际需要，导体直径允许在产品标准中另行规定。此外，不同产品因应用场合的差异，导体标称直径的范围也应由产品标准规定，甚至超越表5.4-1范围。绕组线圆导体尺寸见表5.4-1。

表5.4-1 绕组线圆导体标称直径、最大和最小直径

导体直径 d（mm）			导体直径 d（mm）		
标称值	最小值	最大值	标称值	最小值	最大值
0.010 0	—	—	0.160	0.157	0.163
0.011 2	—	—	0.170	0.167	0.173
0.012 5	—	—	0.180	0.177	0.183
0.014 0	—	—	0.190	0.187	0.193
0.016 0	—	—	0.200	0.197	0.203
0.018 0	—	—	0.212	0.209	0.215
0.020	—	—	0.224	0.221	0.227
0.022	—	—	0.236	0.233	0.239
0.025	—	—	0.250	0.246	0.254
0.028	—	—	0.265	0.261	0.269
0.032	—	—	0.280	0.276	0.284
0.036	—	—	0.300	0.296	0.304
0.040	—	—	0.315	0.311	0.319
0.045	—	—	0.335	0.331	0.339
0.050	—	—	0.355	0.351	0.359
0.056	—	—	0.375	0.371	0.379
0.063	—	—	0.400	0.395	0.405
0.071	0.068	0.074	0.425	0.420	0.430
0.080	0.077	0.083	0.450	0.445	0.455
0.090	0.087	0.093	0.475	0.470	0.480
0.100	0.097	0.103	0.500	0.495	0.505
0.112	0.109	0.115	0.530	0.525	0.535
0.125	0.122	0.128	0.560	0.554	0.566
0.132	0.129	0.135	0.600	0.594	0.606
0.140	0.137	0.143	0.630	0.624	0.636
0.150	0.147	0.153	0.670	0.663	0.677

续表

导体直径 d（mm）			导体直径 d（mm）		
标称值	最小值	最大值	标称值	最小值	最大值
0.710	0.703	0.717	2.000	1.980	2.020
0.750	0.742	0.758	2.120	2.099	2.141
0.800	0.792	0.808	2.240	2.218	2.262
0.850	0.841	0.859	2.360	2.336	2.384
0.900	0.891	0.909	2.500	2.475	2.525
0.950	0.940	0.960	2.650	2.623	2.677
1.000	0.990	1.010	2.800	2.772	2.828
1.060	1.049	1.071	3.000	2.970	3.030
1.120	1.109	1.131	3.150	3.118	3.182
1.180	1.168	1.192	3.350	3.316	3.384
1.250	1.237	1.263	3.550	3.514	3.586
1.320	1.307	1.333	3.750	3.712	3.788
1.400	1.386	1.414	4.000	3.960	4.040
1.500	1.485	1.515	4.250	4.207	4.293
1.600	1.584	1.616	4.500	4.455	4.545
1.700	1.683	1.717	4.750	4.702	4.798
1.800	1.782	1.818	5.000	4.950	5.050
1.900	1.881	1.919	—	—	—

（2）绕组线扁导体尺寸。绕组线扁导体尺寸由窄边 a、宽边 b 和圆角 r 3个参数决定，规格为 $a\times b$。a 和 b 可用R20或R40数系。当 a 和 b 均为R20数系的规格时为优先规格；当 a 和 b 中有一个为R20数系，另一个为R40数系时为中间规格；当 a 和 b 均为R40数系的规格时为不推荐规格。扁线的宽窄比（b/a）应符合以下的规定：$1.4\leqslant b/a\leqslant 8$。绕组线扁导体尺寸偏差见表5.4-2，扁导体的圆角半径见表5.4-3，扁导体的规格较多，常用推荐的优选规格见表5.4-4。扁导体的截面计算为：$S=a\times b-0.858\,4r^2$。

表5.4-2　　扁导体允许偏差 σ　　mm

标称尺寸	偏差 σ
a（b）$\leqslant$3.15	±0.03
3.15$<a$（b）$\leqslant$6.30	±0.05
6.30$<a$（b）$\leqslant$12.50	±0.07
12.50$<a$（b）$\leqslant$16.00	±0.10

表5.4-3　　扁导体圆角半径 r 及允许偏差　　mm

标称尺寸 a	圆角半径 r	
	标称值	偏差（%）
$a\leqslant$1.00	（1/2）a	
1.00$<a\leqslant$1.60	0.50（1）	±25
1.60$<a\leqslant$2.24	0.65（2）	±25
2.24$<a\leqslant$3.55	0.80	±25
3.55$<a$	1.00	±25

注　当 $b>4.75$mm时，经双方协商：圆角半径 r 可为（1/2）a；圆角半径 r 可为0.80mm。

1.2　绕组线的绝缘

绕组线的绝缘按结构、材料和工艺大体上可分为4类。

（1）漆包线。漆包线的绝缘层是漆膜，在导体上涂覆绝缘漆后烘干而成。其特点是绝缘漆膜厚度较薄、涂层均匀、表面光滑。漆包圆线和漆包扁线广泛用于中小型电机绕组及电器、仪表及微型电工电子产品中的线圈。漆包线技术发展很快，近20年来漆包线品种的耐温等级及其他特性均有很大的改进。

（2）绕包线。绕包线是用天然丝、玻璃丝、涤纶丝、绝缘纸、合成树脂薄膜等材料紧密绕包在裸导体或漆包线上形成绝缘层。玻璃丝绕包线需经绝缘漆浸渍、烘干粘结处理形成复合绝缘，厚度也较厚，可提高电气绝缘强度、机械性能及防潮性能，能承受一定的过电压及过负荷。薄膜绕包线具有更高的电气绝缘强度及机械强度，适应性更好，但成本较高，用于电压较高的电机或大中型电工产品。简单的丝包线常用来制作高频线圈，丝包材料的介质损耗应尽量小，同时丝包层增大了导体的间隔，可提高线圈元件的品质因素。纸包线主要制造油浸变压器，绝缘厚度按变压器设计确定。

（3）挤包线。挤包线是根据使用的特殊要求来设计其绝缘结构，如用于潜水电机的耐水绕组线是挤包绝缘，或挤包绝缘及护套结构绕组线。从发展趋势看，挤包层也可很薄，某些场合可代替绕包线和漆包线。

（4）无机绝缘线。无机绝缘绕组线的绝缘层有陶瓷、氧化铝膜等，其特点是耐高温和辐射，加工工艺也各不相同，需根据产品结构而定，主要用于高温及辐射场合。这类绕组线的规格较小，用于小型特殊电机、电器和元件等。

表5.4-4　　扁线常用的推荐标称规格表

计算截面积（mm²）		窄边标称尺寸（mm）																	
		0.80	0.90	1.00	1.12	1.25	1.40	1.60	1.80	2.00	2.24	2.50	2.80	3.15	3.55	4.00	4.50	5.00	5.60
		r=0.5a			r=0.5mm				r=0.6mm			r=0.8mm				r=1.0mm			
宽边标称尺寸（mm）	2.00	1.463	1.626	1.785	2.025	2.285	2.585	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2.24	1.655	1.842	2.025	2.294	2.585	2.921	3.369	宽窄比 $b/a<1.4$ 不推荐				—	—	—	—	—	—	—
	2.50	1.863	2.076	2.285	2.585	2.910	3.285	3.785	4.137	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2.80	2.103	2.346	2.585	2.921	3.285	3.705	4.265	4.677	5.327	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3.15	2.383	2.661	2.935	3.313	3.723	4.195	4.825	5.307	5.937	6.693	—	—	—	—	—	—	—	—
	3.55	2.703	3.021	3.335	3.761	4.223	4.755	5.465	6.027	6.737	7.589	8.326	—	—	—	—	—	—	—
	4.00	3.063	3.426	3.785	4.265	4.785	5.385	6.185	6.837	7.637	8.579	9.451	10.65	—	—	—	—	—	—
	4.50	3.463	3.876	4.285	4.825	5.410	6.085	6.985	7.737	8.637	9.717	10.70	12.05	13.63	—	—	—	—	—
	5.00	3.863	4.326	4.785	5.385	6.035	6.785	7.785	8.637	9.637	10.84	11.95	13.45	15.20	17.20	—	—	—	—
	5.60	4.343	4.866	5.385	6.057	6.785	7.625	8.745	9.717	10.84	12.18	13.45	15.13	17.09	19.33	21.54	—	—	—
	6.30	4.903	5.496	6.085	6.841	7.660	8.605	9.865	10.98	12.24	13.75	15.20	17.09	19.03	21.82	24.34	27.49	—	—
	7.10	—	6.216	6.885	7.737	8.660	9.725	11.15	12.42	13.84	15.84	17.20	19.33	21.82	24.66	27.54	31.09	34.64	—
	8.00	—	—	7.785	8.745	9.785	10.99	12.59	14.04	15.64	17.56	19.45	21.85	24.65	27.85	31.34	35.14	39.14	43.94
	9.00	—	—	—	9.865	11.04	12.39	14.19	15.84	17.64	19.80	21.95	24.65	27.80	31.40	35.14	39.64	44.14	49.54
	10.0	—	—	—	—	12.29	13.79	15.79	17.64	19.64	22.04	24.45	27.45	30.95	34.95	39.14	44.14	49.14	55.14
	11.2	—	—	—	—	—	15.47	17.71	19.80	22.04	24.73	27.45	30.81	34.73	39.21	43.94	49.54	55.14	61.86
	12.5	宽窄比 $b/a>8$ 不推荐						19.79	22.14	24.64	27.64	30.70	34.45	38.83	43.83	49.14	55.39	61.64	69.14
	14.0	—	—	—	—	—	—	—	24.48	27.64	31.00	34.45	38.65	43.55	49.15	55.14	62.14	69.14	77.54
	16.0	—	—	—	—	—	—	—	—	31.64	35.48	39.45	44.25	49.85	56.25	63.14	71.14	79.14	88.74

注　关于中间规格和不推荐规格本表省略，读者可查阅GB/T 6108.3—20035标准。

2 绕组线品种及性能

绕组线品种较多，规格不一，但一些产品的结构、材料、工艺以及使用等方面也具有相似点。有的试验项目相同，但指标有高低；有的指标相同，但试验方法不同。

2.1 漆包圆绕组线

(1) 漆包圆绕组线的型号和名称。参考 GB/T 6109.1～6109.11《漆包圆绕组线》标准（包括 1985、1988、1989 和 1990 版各单篇标准）及其他标准资料，归纳的漆包圆绕组线的型号和产品名称见表 5.4-5 。该标准目前还在进一步修订中，品种将继续扩大，但仍未能覆盖市场需求的全部产品，所以需要经常注意标准修订动向。

(2) 漆包圆绕组线的规格和性能。GB/T 6109.1《漆包圆绕组线 第一部分：一般规定》覆盖了属于该标准漆包线品种的基本规格和技术要求，而 GB/T 6109.2～6109.11 标准的具体产品规格范围并不完全相同，同时这些标准规定的性能及其指标也由各单篇标准产品确定。

1) 漆包圆绕组线规格见表 5.4-6。但每一型号的产品规格范围需查相应产品标准。

2) 导体允许偏差见表 5.4-7。标称直径 0.071mm 以下者，考核直流电阻，应符合表 5.4-9 的规定。导体的 f 值应不超过表 5.4-7 中偏差的绝对值。

3) 漆包圆绕组线最大外径见表 5.4-6，其漆膜厚度见表 5.4-8。

表 5.4-5 漆包圆铜绕组线的品种系列代号、名称和温度指数

序号	系列代号	产 品 名 称	温度指数（℃）（耐温等级）
1	Q	油性漆包圆铜线（该产品已淘汰）	105（A）
2	QQ—1 QQ—2 QQ—3	薄漆膜缩醛漆包圆铜线 厚漆膜缩醛漆包圆铜线 特厚漆膜缩醛漆包圆铜线	120（E）
3	QA—1 QA—2 QA—3	薄漆膜聚氨酯漆包圆铜线 厚漆膜聚氨酯漆包圆铜线 特厚漆膜聚氨酯漆包圆铜线	130（F）
4	QA—1/155 QA—2/155	薄漆膜改性聚氨酯漆包圆铜线 厚漆膜改性聚氨酯漆包圆铜线	155（F）
5	QA—1/180 QA—2/180	薄漆膜改性聚氨酯漆包圆铜线 厚漆膜改性聚氨酯漆包圆铜线	180（H）
6	QZ—1/130 QZ—2/130	薄漆膜聚酯漆包圆铜线 厚漆膜聚酯漆包圆铜线	130（B）
7	QZ（G）—1/155 QZ（G）—2/155	薄漆膜改性聚酯漆包圆铜线 厚漆膜改性聚酯漆包圆铜线	155（F）
8	QZY—1/180 QZY—2/180	薄漆膜聚酯亚胺漆包圆铜线 厚漆膜聚酯亚胺漆包圆铜线	180（H）
9	Q（ZY/X）—1/180 Q（ZY/X）—2/180 Q（ZY/X）—3/180	薄漆膜聚酯亚胺/聚酰胺复合漆包圆铜线 厚漆膜聚酯亚胺/聚酰胺复合漆包圆铜线 特厚漆膜聚酯亚胺/聚酰胺复合漆包圆铜线	180（H）
10	Q（ZY/XY）—1/200 Q（ZY/XY）—2/200	薄漆膜聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包圆铜线 厚漆膜聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包圆铜线	200（C）
11	QY—1/220 QY—2/220	薄漆膜聚酰亚胺漆包圆铜线 厚漆膜聚酰亚胺漆包圆铜线	220（C）
12	QF/105 QF/155	耐冷冻剂漆包圆铜线（该产品已淘汰） 耐冷冻剂漆包圆铜线（该产品已淘汰）	105（A） 155（F）
13	QATWC	无磁性聚氨酯漆包圆铜线	120（B）
14	QAN—1B QAN—2B	薄漆膜热粘合或溶剂粘合聚氨酯漆包圆铜线 厚漆膜热粘合或溶剂粘合聚氨酯漆包圆铜线	130（B）
15	QZN—1B QZN—2B	薄漆膜热粘合或溶剂粘合聚酯漆包圆铜线 厚漆膜热粘合或溶剂粘合聚酯漆包圆铜线	130（F）
16	QZYN/180	热粘合或溶剂粘合聚酯亚胺漆包圆铜线	180（H）
17	QZ（G）N—1B/155（非标） QZ（G）N—2B/155（非标）	薄漆膜改性自粘性聚酯漆包圆铜线（非标产品） 厚漆膜改性自粘性聚酯漆包圆铜线（非标产品）	155（F） 155（F）

注 最近修订 GB/T 6109.1 的品种和变频电机用漆包线等未列入此表。

表 5.4-6 漆包圆绕组线的标称规格及最大外径 mm

导体标称直径	最大外径		
	1级	2级	3级
0.018	0.022	0.024	—
0.020	0.024	0.027	—
0.022	0.027	0.030	—
0.025	0.031	0.034	—
0.028	0.034	0.038	—
0.032	0.039	0.043	—
0.036	0.044	0.049	—
0.040	0.049	0.054	—
0.045	0.055	0.061	—
0.050	0.060	0.066	—
0.056	0.067	0.074	—
0.063	0.076	0.083	—
0.071	0.084	0.091	0.097
0.080	0.094	0.101	0.108
0.090	0.105	0.113	0.120
0.100	0.117	0.125	0.132
0.112	0.130	0.139	0.147
0.125	0.144	0.154	0.163
0.140	0.160	0.171	0.181
0.160	0.182	0.194	0.205
0.180	0.204	0.217	0.229
0.200	0.226	0.239	0.252
0.224	0.252	0.266	0.280
0.250	0.281	0.297	0.312
0.280	0.312	0.329	0.345
0.315	0.349	0.367	0.384
0.355	0.392	0.411	0.428
0.400	0.439	0.459	0.478
0.450	0.491	0.513	0.533
0.500	0.544	0.566	0.587
0.560	0.606	0.630	0.653
0.630	0.679	0.704	0.728
0.710	0.762	0.789	0.814
0.800	0.855	0.884	0.911
0.900	0.959	0.989	1.018
1.000	1.062	1.094	1.124
1.120	1.184	1.217	1.248
1.250	1.316	1.349	1.381
1.400	1.468	1.502	1.535
1.600	1.670	1.706	1.740
1.800	1.872	1.909	1.944
2.000	2.074	2.112	2.148
2.240	2.316	2.355	2.392
2.500	2.578	2.618	2.656
2.800	2.880	2.922	2.961
3.150	3.233	3.276	3.316
3.550	3.635	3.679	3.721
4.000	4.088	4.133	4.176
4.500	4.591	4.637	4.681
5.000	5.093	5.141	5.186

表 5.4-7 漆包圆铜线导体允许偏差 mm

导体标称直径	偏差（±）	导体标称直径	偏差（±）
0.071	0.003	0.630	0.006
0.080	0.003	0.710	0.007
0.090	0.003	0.800	0.008
0.100	0.003	0.900	0.009
0.112	0.003	1.000	0.010
0.125	0.003	1.120	0.011
0.140	0.003	1.250	0.013
0.160	0.003	1.400	0.014
0.180	0.003	1.600	0.016
0.200	0.003	1.800	0.018
0.224	0.003	2.000	0.020
0.250	0.004	2.240	0.022
0.280	0.004	2.500	0.025
0.315	0.004	2.800	0.028
0.355	0.004	3.150	0.032
0.400	0.005	3.550	0.036
0.450	0.005	4.000	0.040
0.500	0.005	4.500	0.045
0.560	0.006	5.000	0.050

表 5.4-8 漆包圆铜线的漆膜厚度 mm

导体标称直径	最小漆膜厚度		
	1级	2级	3级
0.071	0.007	0.012	0.018
0.080	0.007	0.014	0.020
0.090	0.008	0.015	0.022
0.100	0.008	0.016	0.023
0.112	0.009	0.017	0.026
0.125	0.010	0.019	0.028
0.140	0.011	0.021	0.030
0.160	0.012	0.023	0.033
0.180	0.013	0.025	0.036
0.200	0.014	0.027	0.039
0.224	0.015	0.029	0.043
0.250	0.017	0.032	0.048
0.280	0.018	0.033	0.050
0.315	0.019	0.035	0.053
0.355	0.020	0.038	0.057
0.400	0.021	0.040	0.060
0.450	0.022	0.042	0.064
0.500	0.024	0.045	0.067
0.560	0.025	0.047	0.071
0.630	0.027	0.050	0.075
0.710	0.028	0.053	0.080
0.800	0.030	0.056	0.085
0.900	0.032	0.060	0.090
1.000	0.034	0.063	0.095
1.120	0.034	0.065	0.098
1.250	0.035	0.067	0.100
1.400	0.036	0.069	0.103
1.600	0.038	0.071	0.107
1.800	0.039	0.073	0.110
2.000	0.040	0.075	0.113
2.240	0.041	0.077	0.116
2.500	0.042	0.079	0.119
2.800	0.043	0.081	0.123
3.150	0.045	0.084	0.127
3.550	—	0.086	0.130
4.000	—	0.089	0.134
4.500	—	0.092	0.138
5.000	—	0.095	0.142

4）铜导体直流电阻，直径为 0.71mm 以下应符合表 5.4-9 规定，但直径为 0.71mm 及以上和直径为 1.000mm 及以下不作规定。当用户有要求时，可双方协商符合表 5.4-9 的数据范围。

5）圆铜线导体断裂伸长率规定见表 5.4-10。

表 5.4-9 漆包线圆铜导体的直流电阻

导体标称直径	直流电阻（Ω/m）（20℃时）		
(mm)	最小	标称	最大
0.018	60.46	67.18	73.89
0.020	48.97	54.41	59.85
0.022	40.47	44.97	49.47
0.025	31.34	34.82	38.31
0.028	24.99	27.76	30.54
0.032	19.13	21.25	23.38
0.036	15.16	16.79	18.42
0.040	12.28	13.60	14.92
0.045	9.705	10.75	11.79
0.050	7.922	8.706	9.489
0.056	6.316	6.940	7.565
0.063	5.045	5.484	5.922
0.071	3.941	4.318	4.747
0.080	3.133	3.401	3.703
0.090	2.495	2.687	2.900
0.100	2.034	2.176	2.333
0.112	1.632	1.735	1.848

续表

导体标称直径 (mm)	直流电阻（Ω/m）（20℃时）		
	最小	标称	最大
0.125	1.317	1.393	1.475
0.140	1.055	1.110	1.170
0.160	0.812 2	0.850 2	0.890 6
0.180	0.644 4	0.671 8	0.700 7
0.200	0.523 7	0.544 1	0.565 7
0.224	0.418 8	0.433 8	0.449 5
0.250	0.334 5	0.348 2	0.362 8
0.280	0.267 6	0.277 6	0.288 2
0.315	0.212 1	0. 219 3	0.227 0
0.355	0.167 4	0.172 7	0.178 2
0.400	0.131 6	0.136 0	0.140 7
0.450	0.104 22	0.107 5	0.110 9
0.500	0.084 62	0.087 06	0.089 59
0.560	0.067 36	0.069 40	0.071 53
0.630	0.053 35	0.054 84	0.056 38
0.710	0.041 98	0.043 18	0.044 42
0.800	0.033 05	0.034 01	0.035 00
0.900	0.026 12	0.026 87	0.027 65
1.000	0.021 16	0.021 76	0.022 40
1.120	—	0.017 35	—
1.250	—	0.013 93	—
1.400	—	0.011 10	—
1.600	—	0.008 502	—
1.800	—	0.006 718	—
2.000	—	0.005 411	—
2.240	—	0.004 338	—
2.500		0.003 482	—
2.800	—	0.002 776	—
3.150	—	0.002 193	—
3.550	—	0.001 727	—
4.000	—	0.001 360	—
4.500	—	0.001 075	—
5.000	—	0.000 870 6	—

表 5.4-10　　圆铜线导体断裂伸长率

导体标称直径 (mm)	最小伸长率 (%)	导体标称直径 (mm)	最小伸长率 (%)
0.018	—	0.315	23
0.020	6	0.355	23
0.022	6	0.400	24
0.025	7	0.450	25
0.028	7	0.500	25
0.032	8	0.560	26
0.036	8	0.630	27
0.040	9	0.710	28
0.045	9	0.800	28
0.050	10	0.900	29
0.056	10	1.000	30
0.063	12	1.120	30
0.071	13	1.250	31
0.080	14	1.400	32
0.090	15	1.600	32
0.100	16	1.800	32
0.112	17	2.000	33
0.125	17	2.240	33
0.140	18	2.500	33
0.160	19	2.800	34
0.180	20	3.150	34
0.200	21	3.550	35
0.224	21	4.000	35
0.250	22	4.500	36
0.280	22	5.000	36

6）回弹性是漆包线柔软性能的表征，柔软性好，可使线圈卷绕得紧密，外形尺寸精确，但过分柔软，绕线时也容易使导体拉细，电阻增大。柔软性以漆包线回弹角大小表示，回弹角小，柔软性好。漆包圆铜线的回弹角最大值见表 5.4-11。

7）耐溶剂性能是考核漆包线在工艺上要接触漆的有机溶剂或其他化学溶剂，需进行具有代表性的耐溶剂试验。通常用配制的标准混合溶剂成分如下：200 号溶剂汽油 60%，二甲苯 30%，丁醇 10%。进行试验时将漆包线样品浸在 60℃±3℃的上述溶剂中 30min 后取出试样，采用测定铅笔硬度的方法，测定漆膜表面硬度，要求不低于“1H”级。

表 5.4-11　　漆包圆铜线的回弹角最大值

导体标称直径 (mm)	圆棒直径 (mm)	负荷 (N)	最大回弹角（°）		
			1 级	2 级	3 级
0.080	5	0.25	70	80	100
0.090			67	77	94
0.100			64	73	90
0.112	7	0.50	64	73	88
0.125			62	70	84
0.140			59	67	79
0.160	10	1.0	59	67	78
0.180			57	65	75
0.200			54	62	72
0.224	12.5	2.0	51	59	68
0.250			49	56	65
0.280			47	53	61
0.315	19	4.0	50	55	62
0.355			48	53	59
0.400			45	50	55
0.450	25	8.0	44	48	53
0.500			43	47	51
0.560			41	44	48
0.630	37.5	12.0	46	50	53
0.710			44	47	50
0.800			41	43	46
0.900	50	15.0	45	48	51
1.000			42	45	47
1.120			39	41	43
1.250			35	37	39
1 400			32	34	36
1.600			28	30	32

注　1. 介于相邻标称直径间的中间规格，取较大标称直径相应的回弹角。
2. 最大回弹角系指回弹性试验仪的刻度盘上的标度计量数。
3. 直径 1.600mm 以上者最大回弹角应不大于 5°。

8）室温下漆包线的击穿电压是反映漆膜耐受电压的能力，与漆的品种、厚度和导体表面粗糙度有关。试验时 5 个试样中至少有 4 个在规定试验电压下不应击穿。击穿电压试验采用圆棒卷绕法、漆包线扭绞法和钢珠电极法等，这些方法适用不同直径或形状的漆包线，因扭绞法的绝缘间隔等于 2 倍漆膜厚度，所以要求击穿电压较高。标称直径 $d \leqslant 0.100$mm 的漆包圆铜线采用圆棒卷绕法试验，其击穿电压应符合表 5.4-12 的规定。$2.500 \geqslant d > 0.100$mm 的漆包圆铜线采用扭绞法试验，其击穿电压应符合表 5.4-13 的规定。$d > 2.500$mm的漆包圆铜线采用钢珠电极法试验，其击穿电压应符合表 5.4-13 的规定。不同耐温指数漆包线的高温击穿电压试验、试验条件由产品标准规定。

9）漆膜连续性是考核漆层的完整程度，该性能主要用于反映直径 1.600mm 及以下的漆包圆线的漆膜缺陷程度。

直径0.25～1.600mm的漆包圆铜线，在30 m长度内累计击穿数应不大于表5.4-14的规定。对于漆包圆铝线，每30m长度内累计击穿数对于1级漆绝缘厚度应不超过25个，对于2级漆绝缘厚度应不超过10个。

10）漆包线的表面质量需100%检查，表面应光洁，色泽均匀，不应有影响漆包线性能的缺陷。

表5.4-12 直径$d \leqslant 0.100$mm漆包线室温击穿电压

标称直径 (mm)	最小击穿电压（工频有效值）(V)		
	1级	2级	3级
0.018	110	—	—
0.020	120	250	—
0.022	130	275	—
0.025	150	300	—
0.028	170	325	—
0.032	190	375	—
0.036	225	425	—
0.040	250	475	—
0.045	275	550	—
0.050	300	600	—
0.056	325	650	—
0.063	375	700	—
0.071	425	700	—
0.080	425	850	1200
0.090	500	900	1300
0.100	500	950	1400

表5.4-13 直径$d > 0.100$mm漆包圆线室温击穿电压

导体标称直径 (mm)	最小击穿电压（工频有效值）(kV)		
	1级	2级	3级
0.112	1.3	2.7	3.9
0.125	1.5	2.8	4.1
0140	1.6	3.0	4.2
0.160	1.7	3.2	4.4
0.180	1.7	3.3	4.7
0.200	1.8	3.5	5.1
0.224	1.9	3.7	5.2
0.250	2.1	3.9	5.5
0.280	2.2	4.0	5.8
0.315	2.2	4.1	6.1
0.355	2.3	4.3	6.4
0.400	2.3	4.4	6.6
0.450	2.3	4.4	6.8
0.500	2.4	4.6	7.0
0 560	2.5	4.6	7.1
0.630	2.6	4.8	7.1
0.710	2.6	4.8	7.2
0.800	2.6	4.9	7.4
0.900	2.7	5.0	7.6
1.000～2.500	2.7	5.0	7.6
>2.500（钢珠法）	1.3	2.5	3.8

表5.4-14 漆包圆铜线的漆膜连续性

导体标称直径 (mm)	每30m内的缺陷数		
	1级	2级	3级
$d \leqslant 0.050$	60	24	—
$0.050 < d \leqslant 0.080$	60	24	3
$0.080 < d \leqslant 0.125$	40	15	3
$0.125 < d \leqslant 1.6$	25	5	3

11）柔韧性和附着力的概念是表征漆层与导体结合的牢固程度，需按规格大小采用不同方法判断，这些方法包括圆棒卷绕法、拉伸法、急拉断法和剥离扭绞法。标称直径1.600mm及以下者，按表5.4-15规定伸长，并在规定的试棒上卷绕后漆膜不应开裂。直径1.600mm以上者，伸长32%后漆膜不应开裂。直径1.000mm及以下者，经急拉断试验后漆膜不应开裂或不失去附着性。直径1.000mm及以上者，用剥离扭绞法，经R次扭转后漆膜应不失去附着性。计算转数R（取整数）的K值，按漆膜品种而定。$R=K/d$（d为漆包线标称直径mm），K值大表示附着力好。K值的规定见表5.4-16。

表5.4-15 卷绕法柔韧性试验

标称直径d（mm）	卷绕前伸长（%）	试棒直径（mm）
$d \leqslant 0.050$	20①	0.150
$0.050 < d \leqslant 1.600$	—	D②（d）

① 拉伸至铜线的断裂点，取较小值。

② D为漆包线计算外径，试棒直径取D或d，由产品标准规定。

表5.4-16 各品种漆包线的K值

品种	缩醛	聚氨酯	聚酯	聚酯亚胺	聚酰胺酰亚胺	聚酰亚胺
K值	175	150	130	110	110	90

12）热冲击试验是考核漆包线耐高温性能之一，漆包线经卷绕或拉伸的试样，在规定温度下处理后，漆膜不应开裂。各品种规定的卷绕棒的直径不相同，处理温度也不相同，表5.4-17和表5.4-18只是参考数据。

13）软化击穿试验是考核漆包线耐高温性能之一，试样升高到规定温度，施加规定的电压2min不应因漆层软化而发生电击穿。不同品种漆包线的软化击穿温度可参考表5.4-18的规定。

14）高温电压试验是考核漆包线在热级温度下的耐电性能，体现漆包线使用的可靠性，仅对直径为0.100mm以上的漆包线进行试验。不同品种漆包线的试验温度和电压值由产品标准规定，表5.4-18只是试验温度的参考值，表5.4-19只是击穿电压的参考值。高温击穿一般在用户要求时才进行。

15）耐热性的优劣，或者说在某一点温度的寿命推算，根据国际惯例，采用温度指数评定方法进行推算。取未浸渍的漆包线试样，按照GB 4074.21的规定，外推20 000h的寿命温度。不同品种的漆包线，应不低于表5.4-18规定的相应温度，这项试验工作量虽大，时间较长，但试验结论却容易得到确认。

表5.4-17 热冲击试验条件

标称直径d（mm）	卷绕试棒直径（mm）	伸长率（%）
$d \leqslant 0.040$	0.150①	—
$0.040 < d \leqslant 0.160$ 0	按照产品标准规定	—
$0.160 < d \leqslant 0.250$		—
$0.250 < d \leqslant 1.000$		—
$1.000 < d \leqslant 1.600$		—
$1.600 < d \leqslant 5.000$	—	25～32（各品种不同）

① 伸长至铜线的断裂点，取较小值。

表5.4-18 各品种漆包线的耐高温性能

漆包线简称	耐热等级	温度指数	耐电压试验温度（℃）	热冲击温度（℃）	软化击穿温度（℃）
聚氨酯（已淘汰）	A	105	—	125	170
缩醛	E	120	—	155	170
聚酯	B	130	130	155	240
改性聚酯	F	155	155	175	240
聚酯亚胺	H	180	180	200	300
聚酰胺酰亚胺	C	200	200	220	320
聚酰亚胺	C	220	220	240	400
聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺	C	200	200	220	320

注 同一种漆包线具有不同耐热等级的品种，应按表中温度指数进行试验，新品种以此类推。

16）刮漆性能是体现漆膜的硬度和韧性，刮漆试验是模拟漆包线在绕制、嵌线和整形过程中，漆膜是否有承受摩擦及刮削等作用的能力。不同品种的漆包线，刮漆指标有所不同。常用聚酯及改性聚酯漆包圆铜线的耐刮性能见表5.4-20。

17）耐冷冻剂性能是对制冷压缩机用漆包线的特殊考核，GB/T 4074—1983用冷冻剂进行萃取和发泡试验。试样为0.100～3.00mm的漆包圆铜线，在R-113中被萃取物不应超过0.6%；在R-22中被萃取物不应超过0.25%，发泡试验的起泡数不应超过4个。GB/T 4074—1999改用萃取法和击穿电压法。

18）直焊性是配合某些电子元件制造工艺的特殊试验，要求不需刮漆而直接焊接，直焊不止是省时，也避免刮漆而损伤铜线。聚氨酯类漆包线具有直焊性，试验时把线样放入规定温度的铅锡合金焊接熔液中，经一定时间后，漆膜会分解并具有焊剂作用，此时应观察铜线表面锡层完好情况，判断铜线在使用中焊接的可靠性，以防假焊。一般聚氨酯漆包线试验焊锡温度为375℃±5℃，F级聚氨酯漆包线为390℃±5℃，H级直焊性聚酯亚胺漆包线为470℃±5℃。

19）自粘性是配合制作特殊形状线圈的特殊试验，具有自粘性的漆包线在加热或浸涂溶剂后可以自行粘合，省去浸漆处理工序，也可省去线圈的骨架，如电视机和显示器用偏转线圈等。自粘性漆包线在170℃±2℃下加热30min后的粘合强度，应符合表5.4-21规定。

20）为配合元件制作和性能的需要，另有一些特殊试验，如用于高频场合的聚氨酯类漆包线介质损失角正切（tanδ），在1MHz下应不大于300×10^{-4}。有些特殊环境下使用的漆包线，要求进行盐水针孔、固化度、摩擦系数等性能测试。

21）常用漆包线综合性能比较可参见表5.4-22，但这是相对的概念性含义。总的来说，当前漆包线标准仍跟不上漆包线的技术发展，估计GB/T 6109.1～6109.11《漆包圆绕组线》标准修订后，其技术内容会更明确并定量化。

表5.4-19 漆包线的耐高温击穿电压最小值

导体标称直径 d（mm）	最小交流电压击穿值（V）		导体标称直径 d（mm）	最小交流电压击穿值（V）	
	1级	2级		1级	2级
$0.100<d\leqslant0.112$	1000	2000	$0.355<d\leqslant0.400$	1700	3300
$0.112<d\leqslant0.125$	1100	2100	$0.400<d\leqslant0.450$	1700	3300
$0.125<d\leqslant0.140$	1200	2300	$0.450<d\leqslant0.500$	1800	3500
$0.140<d\leqslant0.160$	1300	2400	$0.500<d\leqslant0.560$	1900	3500
$0.160<d\leqslant0.180$	1300	2500	$0.560<d\leqslant0.630$	2000	3600
$0.180<d\leqslant0.200$	1400	2600	$0.630<d\leqslant0.710$	2000	3600
$0.200<d\leqslant0.224$	1400	2800	$0.710<d\leqslant0.800$	2000	3700
$0.224<d\leqslant0.250$	1600	2900	$0.800<d\leqslant0.900$	2000	3800
$0.250<d\leqslant0.280$	1700	3000	$0.900<d\leqslant2.500$	2000	3800
$0.280<d\leqslant0.315$	1700	3100	$2.500<d\leqslant5.000$	1000	1900
$0.315<d\leqslant0.355$	1700	3200	—	—	—

表5.4-20 聚酯及改性聚酯漆包圆铜线耐刮指标

标称直径（mm）	1级		2级	
	最小刮破力平均值（N）	3次试验中最小刮破力（N）	最小刮破力平均值（N）	3次试验中最小刮破力（N）
0.250	2.70	2.30	4.50	3.80
0.280	2.90	2.45	4.80	4.10
0.315	3.15	2.65	5.20	4.40
0.355	3.40	2.85	5.60	4.75
0.400	3.65	3.05	6.00	5.10
0.450	3.90	3.30	6.45	5.45
0.500	4.20	3.55	6.90	5.85
0.560	4.50	3.80	7.40	6.25
0.630	4.85	4.10	7.90	6.70
0.710	5.20	4.40	8.50	7.20
0.800	5.60	4.70	9.10	7.70
0.900	6.05	5.10	9.70	8.20
1.000	6.55	5.50	10.40	8.80
1.120	7.05	5.95	11.10	9.40
1.250	7.60	6.45	11.90	10.00
1.400	8.20	6.95	12.70	10.80
1.600	8.90	7.55	13.70	11.60
1.800	9.60	8.15	14.70	12.40
2.000	10.30	8.75	15.70	13.30
2.240	11.10	9.40	16.70	14.20
2.500	11.90	10.10	17.80	15.10

表5.4-21 自粘性漆包线最小粘合强度（线圈法）

标称直径 d（mm）	负荷（N）	标称直径 d（mm）	负荷（N）
$d\leqslant0.050$	未定	$0.400<d\leqslant0.500$	1.10
$0.050<d\leqslant0.071$	0.05	$0.500<d\leqslant0.630$	1.60
$0.071<d\leqslant0.100$	0.08	$0.630<d\leqslant0.710$	2.20
$0.100<d\leqslant0.160$	0.12	$0.710<d\leqslant0.800$	2.80
$0.160<d\leqslant0.200$	0.25	$0.800<d\leqslant0.900$	3.40
$0.200<d\leqslant0.315$	0.35	$0.900<d\leqslant1.000$	4.20
$0.315<d\leqslant0.400$	0.70	—	—

表5.4-22 常用漆包线综合性能比较

漆包线品种	耐温等级（℃）	耐刮性	弹性	击穿电压	损耗因素	软化击穿	热态耐压	热冲击	耐溶剂性				耐酸碱盐水溶液				耐冷媒剂
									配方①	配方②	二甲苯	苯乙烯	硫酸	盐酸	氢氧化钠	氯化钠	
油性漆包线（已淘汰）	105	差	好	良	优	差	—	可	差	差	差	差	良	良	好	良	—
缩醛漆包线	120	优	优	良	好	可	—	优	良	差	良	可	良	差	差	良	可
聚氨酯漆包线	120	可	良	良	优	良	—	可	优	优	优	优	优	优	良	优	—
聚酯漆包线	130	良	良	优	好	优	良	可	良	好	良	差	良	良	差	差	差
聚酯亚胺漆包线	155	良	优	优	—	良	良	良	优	优	优	优	良	良	差	良	优
聚酰胺酰亚胺漆包线	200	优	优	优	—	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优
聚酰亚胺漆包线	220	可	优	优	良	优	优	优	优	优	优	优	优	优	差	优	可
聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包线	200	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优
耐冷媒剂漆包线（已淘汰）	105	优	优	优	—	好	—	良	良	可	良	可	—	—	—	—	良

注 1. 配方①成分：溶剂油60%、二甲苯30%、正丁醇10%。

2. 配方②成分：二甲苯50%、正丁醇50%。

3. 每项性能的相对比较，以优、良、好、可、差分等排序。

2.2 漆包扁绕组线

(1) 漆包扁绕组线的型号和名称。参考目前执行的GB/T 7095.1～7095.7标准，并补充一些其他资料介绍漆包线品种，漆包扁绕组线的型号和产品名称见表5.4-23。

表5.4-23 漆包扁铜线的品种系列代号、名称和温度指数

系列代号	产品名称	温度指数（℃）（耐温等级）
QQB—1	120级普通漆膜缩醛漆包扁铜线	120（E）
QQB—2	120级加厚漆膜缩醛漆包扁铜线	
QZB—1/130	130级普通漆膜聚酯漆包扁铜线	130（B）
QZB—2/130	130级加厚漆膜聚酯漆包扁铜线	
QZ（G）B—1/155	155级普通漆膜改性聚酯漆包扁铜线	155（F）
QZ（G）B—2/155	155级加厚漆膜改性聚酯漆包扁铜线	
QZYB—1/180	180级普通漆膜聚酯亚胺漆包扁铜线	180（H）
QZYB—2/180	180级加厚漆膜聚酯亚胺漆包扁铜线	
Q（ZY/XY）B—1/200	200级普通漆膜聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包扁铜线	200（C）
Q（ZY/XY）B—2/200	200级加厚漆膜聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包扁铜线	
QYB—1/220	220级普通漆膜聚酰亚胺漆包扁铜线	220（C）
QYB—2/220	220级加厚漆膜聚酰亚胺漆包扁铜线	
QQBN—1	120级普通漆膜热粘合缩醛漆包扁铜线	120（E）大量用于换位导线
QQBN—2	120级加厚漆膜热粘合缩醛漆包扁铜线	

(2) 漆包扁绕组线的规格和性能。GB/T 7095.1《漆包扁绕组线 第一部分：一般规定》覆盖了属于该标准漆包扁线品种的基本规格和技术要求，而GB/T 7095.2～7095.7标准的具体产品规格范围并不完全相同，同时这些标准规定的性能及其指标也由各单篇标准产品确定。

1) 漆包扁绕组线的常用规格见表5.4-4，中间规格和不推荐规格可由供需方协商。导体窄边、宽边和圆角半径的允许偏差见表5.4-2和表5.4-3，具体产品规格范围由产品标准规定。

2) 漆膜厚度见表5.4-24。

3) 扁导体20℃时直流电阻按以下公式计算：

$$R_{20} = \rho_{20}/S_{min} \quad \Omega/m \tag{5.4-1}$$

$$S_{min} = a_{min}b_{min} - 0.858\,4r_{max}^2 \tag{5.4.2}$$

式中：S_{min}为导体最小截面，按a、b的最小值和r的最大值计算；ρ_{20}为20℃时导体的电阻率，Ω·m，对铜导体，$\rho_{20}=(1/58)\times10^{-6}$ Ω·m，对铝导体，$\rho_{20}=(1/35.7)\times10^{-6}$ Ω·m。

4) 扁铜线导体断裂伸长率应不小于表5.4-25的规定。

表5.4-24 漆包扁线的漆膜厚度

漆 膜	漆膜厚度δ（mm）
1级	$0.06\leqslant\delta\leqslant0.11$
2级	$0.11<\delta\leqslant0.16$

表5.4-25 扁铜线导体断裂伸长率

a边标称尺寸（mm）	最小断裂伸长率（%）	
	铜导体	铝导体
≤2.5	30	17
>2.5	32	

5) 扁铜导体回弹角应不大于5°，铝导体尚在研究中。

6) 漆包扁线耐溶剂性试验是将试样在配制的标准混合溶剂中浸泡后，采用测定铅笔硬度的方法，测定漆膜表面硬度，要求不低于“1H”级。

7) 漆包扁线往复式刮漆试验平均刮漆次数应不低于40次。任何角上的刮漆次数应不低于30次。刮漆试验的负荷应符合GB 4074.15的规定，铝扁线的负荷应符合表5.4-26的规定。

表5.4-26 铝扁线刮漆试验的负荷

漆 膜	负荷（N）	
	a边标称尺寸（mm）	
	0.80～2.36	2.50～5.60
1 级	4	5
2 级	5	6

8) 室温和高温下漆包扁线的击穿电压，规定5个试样中至少有4个符合表5.4-27的规定。允许有一个试样的击穿电压不低于表5.4-27规定的50%。试验采用钢珠法电极。

9) 漆包扁线的表面质量是需要100%检查的项目，表面应光洁，色泽均匀，不应有影响漆包线性能的缺陷。

10) 关于漆包扁线软化击穿和耐变压器油性能正在研究之中。

11) 漆包扁线的窄边和宽边按表5.4-28规定进行弯曲试验，弯曲后漆膜不应开裂。

12) 漆包扁线的漆膜附着性试验（切割法），将漆包扁线拉伸后，漆膜失去附着力的距离应不大于1b。拉伸百分率按表5.4-29规定。

表5.4-27 室温和高温下漆包扁线的击穿电压

漆 膜	最小击穿电压值（工频）（V）	
	室温下	高温下
1 级	1000	750
2 级	2000	1500

表5.4-28 漆包扁线弯曲试验条件

弯曲方式	a和b标称尺寸（mm）	试棒直径（mm）					
		120级缩醛	155级改性聚酯	180级聚酯亚胺	220级聚酰亚胺	130级聚酯	200级聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合
宽边弯曲	a所有尺寸	2a	4a	4a	4a	4a	4a
窄边弯曲	$b\leqslant10$	2b	4b	4b	4b	4b	4b
	$b>10$	3b	5b	5b	5b	5b	5b

表 5.4-29 漆包扁线漆膜附着性拉伸百分率

拉伸（%）					
120级 缩醛	155级 改性聚酯	180级 聚酯亚胺	220级 聚酰亚胺	130级 聚酯	200级 聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合
20	15	15	10	20	15

13）漆包扁线热冲击是将漆包线在直径为 $6a$ 的圆棒进行弯曲，再置于表 5.4-30 规定的温度下进行热冲击试验，漆膜不应开裂。

14）漆包扁线高温击穿电压试验的温度，应符合表 5.4-31规定。

15）漆包扁线未浸渍的试样，其温度指数按照 GB 4074.21的规定评定。

表 5.4-30 漆包扁线进行热冲击的试验温度

热冲击试验温度（℃）					
120级 缩醛	155级 改性聚酯	180级 聚酯亚胺	220级 聚酰亚胺	130级 聚酯	200级 聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合
155～160	170～185	200～205	240～245	155～160	220～225

表 5.4-31 漆包扁线高温击穿电压试验温度

高温击穿电压试验温度（℃）					
120级 缩醛	155级 改性聚酯	180级 聚酯亚胺	220级 聚酰亚胺	130级 聚酯	200级 聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合
120～125	155～160	180～185	220～225	130～135	200～205

2.3 玻璃丝包线

（1）玻璃丝包线型号、规格和尺寸。参考 GB 7672—1987《玻璃丝包绕组线》标准，其导体材料有铜和铝二种，目前铝线的使用量已很少。导体形状分圆线和扁线。绝缘为玻璃丝紧密缠绕在导体上并浸漆，经烘焙粘结成形，也可将玻璃丝与涤纶丝混合紧密缠绕，也能起到粘结作用，玻璃丝包绕组线的耐热性能由浸渍漆的温度指数而定。导体也可为漆包圆线或漆包扁线，耐热性能由漆包线而定。玻璃丝包绕组线的型号、产品名称、温度指数和规格见表 5.4-32。铝导体的直径允许偏差见表 5.4-33，铜导体标称直径及其最大和最小直径见表 5.4-34，玻璃丝包绝缘厚度见表 5.4-35。扁导体的尺寸、允许偏差 σ、圆角半径 r及其允许偏差与漆包扁铜线导体基本相同，可参见表5.4-2、表 5.4-3 和见表 5.4-4。

（2）玻璃丝包线性能指标。

1）玻璃丝包线圆铝导体的直径偏差应符合表 5.4-33 规定。

表 5.4-33 玻璃丝包圆铝导体的直径偏差

导体标称直径 d（mm）	允许偏差（mm）
$0.30 \leqslant d \leqslant 0.90$	±0.013
$0.90 < d \leqslant 2.50$	±0.025
$2.50 < d \leqslant 5.00$	$\pm 1\% d$

2）玻璃丝包线圆铜导体的直径和直流电阻应符合表 5.4-34 规定。

3）玻璃丝包线圆铝导体的直流电阻在考虑中。

4）玻璃丝包线铜和铝导体伸长率见表 5.4- 35。

5）玻璃丝包圆线（包括玻璃丝包漆包线）的绝缘厚度应符合表 5.4-36 规定。

6）玻璃丝包扁线（包括玻璃丝包漆包线和薄膜绕包线）的绝缘厚度应符合表 5.4-37 规定。

表 5.4-32 玻璃丝包圆线和扁线型号、产品名称和温度指数

型号	产品名称	温度指数（℃）	规格（mm）
SBE/130	温度指数为 130 的双玻璃丝包圆铜线	130	圆线直径 d：0.300～5.000 扁线 a，b 尺寸： a：0.80～5.60 b：2.00～16.0
SBEL/130	温度指数为 130 的双玻璃丝包圆铝线		
SBE/155	温度指数为 155 的双玻璃丝包圆铜线	155	
SBEL/155	温度指数为 155 的双玻璃丝包圆铝线		
SBE/180	温度指数为 180 的双玻璃丝包圆铜线	180	
SBEL/180	温度指数为 180 的双玻璃丝包圆铝线		
SBQ/130	温度指数为 130 的单玻璃丝包漆包圆铜线	130	
SBQ/155	温度指数为 155 的单玻璃丝包漆包圆铜线	155	
SBQ/180	温度指数为 180 的单玻璃丝包漆包圆铜线	180	
SBEB/130	温度指数为 130 的双玻璃丝包铜扁线	130	
SBELB/130	温度指数为 130 的双玻璃丝包铝扁线		
SBEB/155	温度指数为 155 的双玻璃丝包铜扁线	155	
SBEB/180	温度指数为 180 的双玻璃丝包铜扁线	180	
SBQB/130	温度指数为 130 的单玻璃丝包漆包铜扁线	130	
SBEQB/130	温度指数为 130 的双玻璃丝包漆包铜扁线		
SBQLB/130	温度指数为 130 的单玻璃丝包漆包铝扁线		
SBEQLB/130	温度指数为 130 的双玻璃丝包漆包铝扁线		
SBQB/155	温度指数为 155 的单玻璃丝包漆包铜扁线	155	
SBEQB/155	温度指数为 155 的双玻璃丝包漆包铜扁线		
SBQB/180	温度指数为 180 的单玻璃丝包漆包铜扁线	180	
SBEQB/180	温度指数为 180 的双玻璃丝包漆包铜扁线		
SBMB/130	温度指数为 130 的单玻璃丝包薄膜绕包扁线	130	
SBEMB/130	温度指数为 130 的双玻璃丝包薄膜绕包扁线		
SBMB/155	温度指数为 155 的单玻璃丝包薄膜绕包扁线	155	
SBEMB/155	温度指数为 155 的双玻璃丝包薄膜绕包扁线		
SBMB/180	温度指数为 180 的单玻璃丝包薄膜绕包扁线	180	
SBEMB/180	温度指数为 180 的双玻璃丝包薄膜绕包扁线		

7）玻璃丝包线的柔韧性用卷绕法试验，圆棒直径按表5.4-38和表5.4-39规定，经卷绕后绝缘不应开裂。扁线窄边和宽边经弯曲后绝缘均不应开裂。单玻璃丝包薄膜绕包扁线的弯曲性能不作考核。

8）玻璃丝包线的附着性用拉伸法进行试验，伸长的百分率按表5.4-40规定，圆线和扁线经拉伸后绝缘应不失去附着力。对玻璃丝包薄膜绕包扁线附着力不作考核。

9）室温下玻璃丝包圆线或扁线，按表5.4-41进行卷绕，再用钢珠电极法按表5.4-41规定进行电压试验，试验时规定5个试样中至少有4个不应击穿。

表5.4-34　玻璃丝包圆铜导体标称、最大和最小直径及直流电阻

导体直径（mm）			直流电阻（Ω/m）（20℃时）	
标称值	最小值	最大值	最小值	最大值
0.300	0.296	0.304	0.233 6	0.250 6
0.315	0.311	0.319	0.212 1	0.227 0
0.335	0.331	0.339	0.187 8	0.200 4
0.355	0.351	0.359	0.167 4	0.178 2
0.375	0.371	0.379	0.150 3	0.159 5
0.400	0.395	0.405	0.131 6	0.140 7
0.425	0.420	0.430	0.116 7	0.124 5
0.450	0.445	0.455	0.104 2	0.110 9
0.475	0.470	0.480	0.093 71	0.099 42
0.500	0.495	0.505	0.084 62	0.089 59
0.530	0.525	0.535	0.075 39	0.079 65
0.560	0.554	0.566	0.067 36	0.071 53
0.600	0.594	0.606	0.058 76	0.062 22
0.630	0.624	0.636	0.053 35	0.056 38
0.670	0.663	0.677	0.047 08	0.049 94
0.710	0.703	0.717	0.041 98	0.044 42
0.750	0.742	0.758	0.037 56	0.039 87
0.800	0.792	0.808	0.033 05	0.035 00
0.850	0.841	0.859	0.029 25	0.031 04
0.900	0.891	0.909	0.026 12	0.027 65
0.950	0.940	0.960	0.023 42	0.024 84
1.000	0.990	1.010	0.021 16	0.022 40
1.060	1.049	1.071	0.018 81	0.019 95
1.120	1.109	1.131	0.016 87	0.017 85
1.180	1.168	1.192	0.015 19	0.016 09
1.250	1.237	1.263	0.013 53	0.014 35
1.320	1.307	1.333	0.012 14	0.012 85
1.400	1.386	1.414	0.010 79	0.011 43
1.500	1.485	1.515	0.009 402	0.009 955
1.600	1.584	1.616	0.008 237	0.008 749
1.700	1.683	1.717	0.007 320	0.007 750
1.800	1.782	1.818	0.006 529	0.006 913
1.900	1.881	1.919	0.005 860	0.006 204
2.000	1.980	2.020	0.005 289	0.005 600
2.120	2.099	2.141	0.004 708	0.004 983
2.240	2.218	2.262	0.004 218	0.004 462
2.360	2.336	2.384	0.003 797	0.004 028
2.500	2.475	2.525	0.003 385	0.003 584
2.650	2.623	2.677	0.003 014	0.003 190
2.800	2.772	2.828	0.002 698	0.002 857
3.000	2.970	3.030	0.002 351	0.002 488
3.150	3.118	3.182	0.002 131	0.002 285
3.350	3.316	3.384	0.001 885	0.001 996
3.550	3.514	3.586	0.001 678	0.001 778
3.750	3.712	3.788	0.001 504	0.001 593
4.000	3.960	4.040	0.001 322	0.001 400
4.250	4.207	4.293	0.001 171	0.001 240
4.500	4.455	4.545	0.001 045	0.001 106
4.750	4.702	4.798	0.000 937 5	0.000 992 8
5.000	4.950	5.050	0.000 846 2	0.000 895 8

表5.4-35　铜和铝导体伸长率

产品品种	导体材料	导体标称直径 d（mm）	伸长率不小于（%）
绕包圆线	铜	$0.30 \leqslant d \leqslant 0.40$	20
		$0.40 < d \leqslant 1.50$	25
		$1.50 < d \leqslant 5.00$	30
	铝	$0.30 \leqslant d \leqslant 1.00$	15
		$1.00 < d \leqslant 5.00$	20
绕包扁线	铜	$a \leqslant 2.50$	30
		$a > 2.50$	32
	铝	$a \leqslant 2.50$	17
		$a > 2.50$	

表5.4-36　玻璃丝包圆线绝缘厚度及允许偏差

型号	导体标称直径	绝缘厚度（mm）		允许偏差（%）
		薄型	厚型	
SBE	$0.30 \leqslant d \leqslant 3.0$	0.12	0.25	−20
	$3.0 < d \leqslant 4.00$	0.20	0.30	
	$4.0 < d \leqslant 5.00$	0.25	0.35	
SBQ	$0.53 \leqslant d \leqslant 0.75$	0.12	0.18	−20
	$0.80 \leqslant d \leqslant 1.00$	0.13	0.19	
	$1.06 \leqslant d \leqslant 1.50$	0.14	0.23	
	$1.60 \leqslant d \leqslant 2.50$	0.20	0.28	

表5.4-37　玻璃丝包扁线绝缘厚度及允许偏差

产品名称							
	双玻璃丝包扁线	绝缘厚度（mm）	0.2	0.3	0.4	0.5	—
		偏差（%）	−20	−20	−20	−20	—
	玻璃丝包漆包扁线	绝缘厚度（mm）	—	0.3	0.4	0.5	—
		偏差（%）	—	−20	−20	−20	—
	玻璃丝包薄膜绕包扁线	绝缘厚度（mm）	—	—	0.4	0.5	0.6
		偏差（%）	—	—	−15	−15	−15

表5.4-38　玻璃丝包圆线卷绕试验　mm

产品名称	圆线标称直径	圆棒直径
双玻璃丝包圆线	$d \leqslant 0.4$	2
	$0.4 < d \leqslant 0.6$	3
	$0.6 < d \leqslant 0.8$	4
	$0.8 < d \leqslant 1.0$	5
	$1.0 < d \leqslant 1.5$	8
	$1.5 < d \leqslant 2.0$	10
	$2.0 < d \leqslant 3.0$	15
	$3.0 < d \leqslant 4.0$	20
	$4.0 < d \leqslant 5.0$	25
单玻璃丝包漆包圆线	$0.53 < d \leqslant 0.6$	3
	$0.6 < d \leqslant 0.8$	4
	$0.8 < d \leqslant 1.0$	5
	$1.0 < d \leqslant 1.5$	8
	$1.5 < d \leqslant 2.0$	10
	$2.0 < d \leqslant 2.5$	15

表 5.4-39 玻璃丝包扁线卷绕试验 mm

产品名称	扁线标称尺寸	圆棒直径	弯曲方式
双玻璃丝包扁线 玻璃丝包漆包扁线 玻璃丝包薄膜绕包扁线	$2.00 \leqslant b \leqslant 8.00$ $8.00 < b \leqslant 16.00$	$10b$ $15b$	窄边弯曲
	$0.8 < a \leqslant 5.60$	$10a$	宽边弯曲

表 5.4-40 玻璃丝包线附着性试验的拉伸率

产品名称	圆线标称直径或扁线标称尺寸（mm）	拉伸率（%）	
		铜	铝
双玻璃丝包圆线	$d < 2.5$ $d \geqslant 2.5$	15 10	10
单玻璃丝包漆包圆线	全部标称直径	15	—
双玻璃丝包扁线	$a < 2.5$ $a \geqslant 2.5$ 铝扁线全部标称尺寸	15 10 —	— — 10
玻璃丝包漆包扁线	全部标称尺寸	15	10

表 5.4-41 玻璃丝包线的耐电压试验

产品名称	圆线标称直径或扁线标称尺寸（mm）	标称绝缘厚度（mm）	击穿电压（V）
双玻璃丝包圆线	$0.30 \leqslant d \leqslant 3.00$	0.12 0.25	250 450
	$3.0 < d \leqslant 4.0$	0.20 0.30	350 500
	$4.0 < d \leqslant 5.0$	0.25 0.35	450 550
单玻璃丝包漆包圆线	全部标称尺寸	薄型 厚型	800 1000
双玻璃丝包扁线	全部标称尺寸	0.2 0.3 0.4 0.5	300 400 500 550
单玻璃丝包漆包扁线	全部标称尺寸	0.3 0.4	1200 1400
双玻璃丝包漆包扁线	全部标称尺寸	0.3 0.4 0.5	1600 1800 2000

2.4 纸包线

（1）纸包线型号、规格和尺寸。由 GB/T 7673.1～3 可知，导体有铜和铝（铝用量少），分圆线和扁线。绝缘为绕包电缆纸。圆线和扁线型号、产品名称、温度指数和主要用途参见表 5.4-42。导体标称直径及其最大和最小值见表 5.4-43，铝导体伸长率见表 5.4-44，允许偏差见表 5.4-45。扁导体规格、允许偏差 σ 和圆角半径 r 及其允许偏差与玻璃丝包线相同。纸包线绝缘至少有 3 层搭盖绕包纸带，超过 3 层时，最内层和最外层应搭盖绕包，其余可间隙绕包，间隙不超过 2mm，当纸带宽度为 9.5mm 及以上时，间隙不超过 3mm。在保证绝缘厚度的前提下，供需方可协商。也可采用其他纸绕包，如聚酰胺纤维纸（Nomax）等。纸包圆线和纸包扁线的绝缘厚度见表 5.4-46 和表 5.4-47，纸包线的绕包节距见表 5.4-48。正在修订中的标准中增加了纸包圆绞线和双纸包扁线。

表 5.4-42 纸包圆线和扁线型号、产品名称和温度指数

型号	产品名称	规格（mm）	温度指数（℃）	主要用途
Z ZL	纸包圆铜线 纸包圆铝线	圆线直径：1.000～5.000	105	油浸变压器线圈
ZA ZLA	500kV 变压器匝间绝缘纸包圆铜线			
	500kV 变压器匝间绝缘纸包圆铝线			
ZB ZLB	纸包扁铜线 纸包扁铝线	扁线 a，b 尺寸：a：0.80～5.60 b：2.00～16.0		
ZAB ZALB	500kV 变压器匝间绝缘纸包扁铜线 500kV 变压器匝间绝缘纸包扁铝线			
未定	聚酰胺纤维纸（Nomax）纸包圆铜线 聚酰胺纤维纸（Nomax）纸包圆铝线	—	—	高温干式变压器线圈和中型高温电机绕组

表 5.4-43 纸包圆铜导体标称、最大和最小直径及直流电阻

导体直径（mm）			直流电阻（Ω/m）（20℃时）	
标称值	最小值	最大值	最小值	最大值
1.000	0.990	1.010	0.021 16	0.022 40
1.060	1.049	1.071	0.018 81	0.019 95
1.120	1.109	1.131	0.016 87	0.017 85
1.180	1.168	1.192	0.015 19	0.016 09
1.250	1.237	1.263	0.013 53	0.014 35
1.320	1.307	1.333	0.012 14	0.012 85
1.400	1.386	1.414	0.010 79	0.011 43
1.500	1.485	1.515	0.009 402	0.009 955
1.600	1.584	1.616	0.008 237	0.008 749
1.700	1.683	1.717	0.007 320	0.007 750
1.800	1.782	1.818	0.006 529	0.006 913
1.900	1.881	1.919	0.005 860	0.006 204
2.000	1.980	2.020	0.005 289	0.005 600
2.120	2.099	2.141	0.004 708	0.004 983
2.240	2.218	2.262	0.004 218	0.004 462
2.360	2.336	2.384	0.003 797	0.004 028
2.500	2.475	2.525	0.003 385	0.003 584
2.650	2.623	2.677	0.003 014	0.003 190
2.800	2.772	2.828	0.002 698	0.002 857
3.000	2.970	3.030	0.002 351	0.002 488
3.150	3.118	3.182	0.002 131	0.002 258
3.350	3.316	3.384	0.001 885	0.001 996
3.550	3.514	3.586	0.001 678	0.001 778
3.750	3.712	3.788	0.001 504	0.001 593
4.000	3.960	4.040	0.001 322	0.001 400
4.250	4.207	4.293	0.001 171	0.001 240
4.500	4.455	4.545	0.001 045	0.001 106
4.750	4.702	4.798	0.000 937 5	0.000 992 8
5.000	4.950	5.050	0.000 846 2	0.000 895 8

表 5.4-44 纸包线的导体伸长率

产品品种	导体材料	圆线标称直径或扁线标称尺寸（mm）	伸长率不小于（%）
纸包圆线	铜	$1.000 \leqslant d \leqslant 3.000$ $3.150 \leqslant d \leqslant 5.000$	25 30
	铝	$d=1.000$ $d>1.000$	15 20
纸包扁线	铜	$0.80 \leqslant a \leqslant 2.50$ $2.65 \leqslant a \leqslant 5.60$	30 32
	铝	$0.80 \leqslant a \leqslant 5.60$	17

表 5.4-45 纸包圆线铝导体标称直径及其偏差 mm

导体标称直径 d	允许偏差
$0.30 \leqslant d \leqslant 0.90$	±0.013
$0.90 < d \leqslant 2.50$	±0.025
$2.50 < d \leqslant 5.00$	±1%d

表 5.4-46 纸包圆线的绝缘厚度及允许偏差（1.000＜d≤5.000） mm

标称	0.30	0.45	0.80	1.20	1.80	4.25
偏差	±0.05	±0.05	±0.10	±0.12	±0.15	±0.30

表 5.4-47 纸包扁线的绝缘厚度及最大和最小值（全部规格） mm

绝缘标称厚度	0.45	0.60	0.95	1.35	1.60	1.95	2.45	2.95
绝缘最大厚度	0.57	0.74	1.14	1.56	1.84	2.23	2.77	3.32
绝缘最小厚度	0.40	0.53	0.85	1.20	1.45	1.80	2.30	2.75

表 5.4-48 纸包线的绕包节距

产品品种	导体直径或截面	绕包节距
纸包圆线	$d \leqslant 3.50$mm $d>3.50$mm	20 30
纸包扁线	$S \leqslant 50$mm^2 $S>50$mm^2	30 35

（2）纸包线性能。

1）纸包圆铜线的直流电阻应符合表 5.4-43 的规定。纸包圆铝线的直流电阻在考虑中。

2）纸包圆线按表 5.4-49 卷绕后，纸绝缘不应开裂或露缝，无明显翘边。纸包扁线按表 5.4-50 弯曲后，纸绝缘不应开裂或露缝，无明显翘边。

表 5.4-49 纸包圆线的卷绕试验规定

绝缘标称厚度 δ（mm）	试验方式	试棒直径（mm）
$0.30 \leqslant \delta \leqslant 0.80$	卷绕	100
$1.20 \leqslant \delta \leqslant 4.25$		150

表 5.4-50 纸包扁线的弯曲试验规定

绝缘标称厚度 δ（mm）	试验方式	试棒直径（mm）
$0.45 \leqslant \delta \leqslant 1.35$	宽边弯曲	150
$1.35 < \delta \leqslant 2.95$		200

2.5 丝包线

（1）丝包线的型号和规格。丝包线的型号和规格见表 5.4-51。丝包线的结构：导体有单根漆包铜线或多根束合的漆包铜线，其外缠绕天然丝或涤纶丝，可以单层缠绕或双层缠绕，若为双层，则二层缠绕方向应相反。束线结构可减少导体的集肤效应，丝包层只是增加匝间距离，可减少导体的临近效应，二者均可提高线圈的品质因素。

（2）丝包线的性能要求。参考 GB 11018—1989《丝包铜绕组线》标准，其漆包圆铜线均应分别符合 GB 6109.4 中的 QA—1 型和 GB 6109.2 中的 QZ—1/155/I 型和 GB 6109.3 中的 QQ—2 型要求。

1）丝包线按表 5.4-52 规定卷绕后，丝包层不应开裂，也不应露漆膜。

2）丝包单根漆包线最大外径和直流电阻应符合表 5.4-53规定。

3）聚氨酯系列漆包线（SQA 型等）应进行可焊性试验，试验温度为 375℃±2℃，浸锡时间按表 5.4-54 和表 5.4-55 规定。锡层应光洁，无针孔和漆膜残渣。

4）丝包线的丝层厚度参考表 5.4-56。丝包漆包束线标称外径参考表 5.4-57。

表 5.4-51 丝包线型号和规格

型号	产品名称	规格	主要用途
SQZ	单丝包聚酯漆包铜线	圆线直径：1.000～5.000mm	高频线圈和类似电子元件
SDQZ	单涤纶丝包聚酯漆包铜线		
SEQZ	双天然丝包漆包铜线		
SEDQZ	双涤纶丝包聚酯漆包铜线		
SQQ	单天然丝包缩醛漆包铜线		
SEQQ	双天然丝包缩醛漆包铜线		
SQA	单天然丝包聚氨酯漆包铜线		
SDQA	单涤纶丝包聚氨酯漆包铜线		
SEQA	双天然丝包聚氨酯漆包铜线		
SEDQA	双涤纶丝包聚氨酯漆包铜线		
SJ	单天然丝包漆包铜束线	导体截面：0.001 50～1.010mm^2	
SEJ	双天然丝包漆包铜束线		
SDJ	单涤纶丝包漆包铜束线		
SEDJ	双涤纶丝包漆包铜束线		

表 5.4-52 丝包线弯曲试验

漆包线型号	试棒直径（mm）	卷绕圈数
SQZ、SQQ、SQA、SDQZ、SDQA	10d（最小 4mm）	10
SEQZ、SEQQ、SEQA、SEDQZ、SEDQA	5d（最小 3mm）	
SJ、SEJ、SDJ、SEDJ	10d	

表 5.4-53 丝包单根漆包线最大外径和直流电阻

漆包线直径（mm）	丝包线最大外径（mm）		直流电阻（Ω/m）（20℃时）	
	单丝包线	双丝包线	最小值	最大值
0.050	0.14	0.18	7.922	9.489
0.063	0.15	0.19	5.045	5.922
0.071	0.16	0.20	3.994	4.641
0.080	0.17	0.21	3.166	3.635
0.090	0.18	0.22	2.515	2.859
0.100	0.19	0.23	2.046	2.307
0.112	0.20	0.24	1.632	1.848
0.125	0.21	0.25	1.317	1.475
0.140	0.23	0.27	1.055	1.170
0.160	0.26	0.30	0.812 2	0.890 6
0.180	0.28	0.32	0.644 4	0.700 7
0.200	0.30	0.35	0.523 7	0.565 7
0.224	0.33	0.37	0.418 8	0.449 5
0.250	0.37	0.42	0.334 5	0.362 8

续表

漆包线直径 (mm)	丝包线最大外径 (mm)		直流电阻 (Ω/m) (20℃时)	
	单丝包线	双丝包线	最小值	最大值
0.280	0.40	0.45	0.267 6	0.288 2
0.315	0.43	0.48	0.212 1	0.227 0
0.355	0.48	0.53	0.167 4	0.178 2
0.400	0.53	0.58	0.131 6	0.140 7
0.450	0.58	0.63	0.104 2	0.110 9
0.500	0.63	0.68	0.084 62	0.089 59
0.530	0.67	0.72	0.075 39	0.079 65
0.560	0.70	0.75	0.067 36	0.071 53
0.600	0.74	0.79	0.058 76	0.062 22
0.630	0.77	0.83	0.053 35	0.056 38
0.670	0.82	0.87	0.047 22	0.049 79
0.710	0.86	0.91	0.041 98	0.044 42
0.750	0.91	0.97	0.037 56	0.039 87
0.800	0.96	1.02	0.033 05	0.035 00
0.850	1.01	1.07	0.029 25	0.031 04
0.900	1.06	1.12	0.026 12	0.027 65
0.950	1.11	1.17	0.023 42	0.024 84
1.000	1.18	1.24	0.021 16	0.022 40
1.060	1.25	1.31	0.018 81	0.019 95
1.120	1.31	1.37	0.016 87	0.017 85
1.180	1.37	1.43	0.015 19	0.016 09
1.250	1.44	1.50	0.013 53	0.014 35
1.320	1.49	1.55	0.012 14	0.012 85
1.400	1.59	1.65	0.010 79	0.011 43
1.500	1.69	1.75	0.009 402	0.009 955
1.600	1.80	1.87	0.008 237	0.008 749
1.700	1.90	1.97	0.007 320	0.007 750
1.800	2.00	2.07	0.006 529	0.006 913
1.900	2.10	2.17	0.005 860	0.006 204
2.000	2.20	2.27	0.005 289	0.005 600
2.120	2.32	2.39	0.004 708	0.004 983
2.240	2.44	2.51	0.004 218	0.004 462
2.360	2.56	2.63	0.003 797	0.004 023
2.500	2.70	2.77	0.003 385	0.003 584

表 5.4-54 丝包单根漆包线浸锡时间

漆包线导体标称直径 d (mm)	浸入锡槽时间 (s)
$d \leqslant 0.1$	2
$0.1 < d \leqslant 0.3$	3
$0.3 < d$	10

表 5.4-55 丝包束合漆包线浸锡时间

漆包线导体标称截面 S (mm^2)	浸入锡槽时间 (s)
$S \leqslant 0.080$	3
$0.080 < S \leqslant 0.125$	4
$0.125 < S \leqslant 0.200$	5
$0.200 < S \leqslant 0.300$	6
$0.300 < S \leqslant 0.500$	8
$0.500 < S \leqslant 0.800$	10
$0.800 < S$	供需双方协商

表 5.4-56 丝 包 层 厚 度

束线标称外径 D (mm)	丝包层数	丝包层厚度 (mm)
$D \leqslant 0.450$	单层	0.030～0.035
$0.450 < D \leqslant 0.600$		0.035～0.040
$0.600 < D \leqslant 1.000$	双层	0.060～0.070
$1.000 < D$		0.070～0.080

表 5.4-57 丝包漆包束线标称外径

漆包线根数	漆包线导体标称直径 (mm)					
	0.025	0.032	0.040	0.050	0.063	0.071
	束线标称外径 D (mm)					
3	0.095	0.115	0.130	0.155	0.190	0.205
4	0.105	0.125	0.150	0.175	0.215	0.235
5	0.115	0.135	0.160	0.190	0.235	0.255
6	0.120	0.145	0.175	0.205	0.255	0.275
8	0.135	0.165	0.195	0.235	0.285	0.315
10	0.145	0.180	0.215	0.260	0.315	0.350
12	0.160	0.195	0.230	0.280	0.345	0.380
16	0.180	0.220	0.265	0.320	0.395	0.435
20	0.195	0.245	0.295	0.355	0.440	0.490
25	0.220	0.270	0.325	0.395	0.500	0.550
32	0.240	0.300	0.365	0.445	0.560	0.615
40	0.265	0.330	0.405	0.500	0.620	0.715
60	0.320	0.400	0.495	0.605	0.780	0.860
100	0.405	0.510	0.625	0.795	0.985	1.100
160	0.505	0.635	0.810	0.990	1.240	1.370
250	0.625	0.815	0.995	1.230	1.530	1.695

2.6 纸绝缘漆包换位导线

换位导线用于绕制大容量变压器的线圈，由多根平行漆包扁线组成，其外用电缆纸总包。平行漆包扁线的位置要定距换位，因此绕组内每根漆包扁线的长度基本相等，磁链也相同，因而消除了循环电流所产生的损耗。单根漆包线的尺寸较小，并且相互绝缘，降低了电流集肤效应，可提高电流密度，增加容量。与采用多根纸包线相比，提高了空间因数，减小变压器体积，截面规格也可做得大一些，以提高绕组的机械强度。过去曾采用过铝导体，现按 JB/T 6758—1993 标准制造，只规定铜扁线。该标准正在修改中，还要补充新的派生品种。

(1) 纸绝缘漆包换位导线的型号为 HZQQ，其剖面见图 5.4-1。

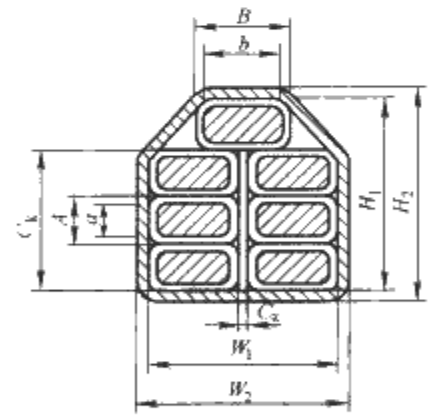


图 5.4-1 换位导线示意图

H_1—换位线芯高度；H_2—换位导线高度；W_1—换位线芯宽度；W_2—换位导线宽度；A—漆包扁线窄边尺寸；B—漆包扁线宽边尺寸；a—漆包扁线导体窄边标称尺寸；b—漆包扁线导体宽边标称尺寸；C_z—中间衬纸厚度；C_k—中间衬纸宽度

(2) 漆包铜扁线应符合缩醛漆包铜扁线的规定 (GB 7095)，漆膜厚度为 1 级，而 2 级厚度也在考虑中，将来也有可能部分采用纸包线。

(3) 扁导体的宽边与窄边之比为：$2 \leqslant (b/a) \leqslant 5$。

(4) 漆包扁线的根数规定为 5～41 奇数列，而偶数列尚在考虑中。

（5）绕包的电缆纸厚度为0.045～0.13mm，当线芯高尺寸 H_1＞10mm 时，二列漆包扁线之间应加一层中间衬纸，衬纸厚度为0.13mm的电缆纸。

（6）导体的换位节距不超过 $6\pi b$，具体数字可由双方协商。

（7）纸绝缘漆包换位导线由3层及以上电缆纸搭盖绕包，具体纸带厚度和层数可由双方协商，纸带宽度不超过 W_1 和 H_1 之和的1.5倍，但最大不超过35mm。若用户要求在中间的全部纸包层或部分纸包层用间隙绕包，则间隙宽度不超过2mm。搭盖绕包的各层方向允许相反，间隙绕包的各层方向必须相同，但其层数不应超过8层，超过8层时应改变绕包方向。

（8）纸绝缘厚度应符合表5.4-58的规定。

（9）相邻二导体之间应进行直流500V耐电压试验，不应击穿。

（10）每一导体应进行导通测试。

表5.4-58　　换位导线的绝缘标称厚度及其偏差　　mm

序号	标称厚度	允许偏差	序号	标称厚度	允许偏差
1	0.45	±0.06	8	1.95	±0.10
2	0.60	±0.06	9	2.45	±0.12
3	0.75	±0.08	10	2.95	±0.12
4	0.95	±0.08	11	3.15	±0.15
5	1.20	±0.10	12	3.55	±0.15
6	1.35	±0.10	13	4.00	±0.15
7	1.60	±0.10	—	—	—

2.7 潜水电机绕组线

潜水电机绕组线是专为潜水泵设计的特种绕组线，在工作时直接与水接触，所以也称耐水绕组线（简称耐水线）。为了保证其径向水密封性能，采用了挤包绝缘方式。同时又为了防止制造电机过程中聚乙烯绝缘擦伤，绝缘外再挤包尼龙护套。目前国内按JB/T 4014—1996标准制造。耐水绕组线的额定电压至少等于该交流潜水电机的额定电压。

（1）潜水电机绕组线的型号和产品名称见表5.4-59。

（2）各产品的导体结构及其标称截面、绝缘厚度、护套厚度及成品外径见表5.4-60～表5.4-64。

（3）绝缘层的偏心度应不大于15%。

（4）各产品的导体20℃时的直流电阻见表5.4-60～表5.4-64。

（5）成品应整圈或整盘浸入室温水中至少24h后，进行交流电压试验，施加电压时间为1min，试验电压为2倍额定电压（U_0 对地电压）加1000V，但不得低于3000V，耐水线不应击穿。

（6）测量成品20℃时的绝缘电阻，应从通过电压试验的成品上取样，试样长度至少为10m，并浸入20℃的水中24h后进行测量，测试电压为直流1000V，试验结果应符合表5.4-65的规定。

（7）成品应按表5.4-66规定的压力，在密封容器中进行耐水压试验，线的二端通过密封圈引出，经24h水压后，在引出线的导体上施加规定的电压，耐水线不应击穿。

（8）耐水线的加速寿命试验应符合表5.4-67的规定。

（9）耐水线成品上剥取的聚氯乙烯绝缘层和聚乙烯绝缘（连带尼龙护套）和交联聚乙烯，在室温下的机械性能应符合表5.4-68的规定。

（10）耐水线成品上剥取的交联聚乙烯绝缘，用萃取法测定的凝胶率（交联度）应不小于70%。

（11）耐水线的表面应光洁平整，无杂质、气泡及机械损伤。

表5.4-59　　耐水绕组线的型号和产品名称

型号	产品名称
SQYN	漆包铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线
SJYN	绞合铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线
SV	实心铜导体聚氯乙烯绝缘耐水绕组线
SJV	绞合铜导体聚氯乙烯绝缘耐水绕组线
SYJN	实心铜导体交联聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线
SJYJN	绞合铜导体交联聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线

表5.4-60　　SQYN型漆包铜导体耐水线结构

漆包铜线标称直径（mm）	导体直径偏差±（mm）	漆包线最大外径（mm）	导体标称截面（mm²）	聚乙烯绝缘标称厚度（mm）	尼龙护套标称厚度（mm）	成品平均外径上限（mm）	直流电阻（Ω/m）	
							最小值	最大值
0.60	0.006	0.674	0.28	0.30	0.10	1.60	0.058 76	0.062 22
0.63	0.006	0.704	0.31	0.30	0.10	1.65	0.053 35	0.056 38
0.67	0.007	0.749	0.35	0.30	0.10	1.70	0.047 22	0.049 79
0.71	0.007	0.789	0.40	0.30	0.10	1.75	0.041 98	0.044 42
0.75	0.008	0.843	0.45	0.30	0.10	1.80	0.037 56	0.039 87
0.80	0.008	9.884	0.50	0.30	0.10	1.85	0.033 05	0.035 00
0.85	0.009	0.939	0.56	0.30	0.10	1.90	0.029 25	0.031 04
0.90	0.009	0.989	0.63	0.30	0.10	1.95	0.026 12	0.027 65
0.95	0.010	1.044	0.71	0.30	0.10	2.00	0.023 42	0.024 84
1.00	0.010	1.094	0.80	0.30	0.10	2.05	0.021 16	0.022 40
1.06	0.011	1.157	0.90	0.30	0.10	2.10	0.018 81	0.019 95
1.12	0.011	1.217	1.00	0.30	0.12	2.20	0.016 87	0.017 85
1.18	0.012	1.279	1.12	0.30	0.12	2.25	0.015 19	0.016 09
1.25	0.013	1.319	1.25	0.30	0.12	2.30	0.013 53	0.014 35
1.30	0.013	1.402	1.32	0.30	0.12	2.40	0.012 52	0.013 25
1.32	0.013	1.122	1.40	0.30	0.12	2.40	0.012 14	0.012 85
1.40	0.014	1.502	1.60	0.30	0.12	2.45	0.010 79	0.011 43
1.50	0.015	1.606	1.80	0.35	0.12	2.65	0.009 402	0.009 955
1.60	0.016	1.706	2.00	0.35	0.12	2.75	0.008 237	0.008 749
1.70	0.017	1.809	2.24	0.40	0.15	3.00	0.007 320	0.007 750
1.80	0.018	1.909	2.50	0.45	0.15	3.20	0.006 529	0.006 913
1.90	0.019	2.012	2.80	0.45	0.15	3.30	0.005 860	0.006 204
2.00	0.020	2.112	3.15	0.45	0.15	3.40	0.005 289	0.005 600
2.12	0.021	2.235	3.55	0.50	0.15	3.65	0.004 708	0.004 983
2.24	0.022	2.355	4.00	0.50	0.15	3.75	0.004 218	0.904 462
2.36	0.024	2.478	4.50	0.55	0.15	4.00	0.003 797	0.004 023
2.50	0.025	2.618	5.00	0.55	0.15	4.10	0.003 385	0.003 584

表 5.4-61　　SJYN 型和 SJYJN 型绞合铜导体耐水线结构

绞合铜线结构根数/直径（mm）	绞合导体标称直径（mm）	导体标称截面（mm^2）	聚乙烯标称厚度（mm）	交联聚乙烯标称厚度（mm）	尼龙护套标称厚度（mm）	成品平均外径上限（mm）	直流电阻最大值（Ω/m）
7/0.80	2.40	3.55	0.55	0.55	0.15	3.90	0.005 098
7/0.90	2.70	4.5	0.55	0.55	0.15	4.20	0.004 028
7/1.00	3.00	5.6	0.60	0.60	0.15	4.60	0.003 263
7/1.12	3.36	7.1	0.60	0.60	0.15	4.95	0.002 601
19/0.63	3.15	6	0.65	0.65	0.15	4.85	0.003 028
19/0.71	3.55	7.5	0.65	0.65	0.15	5.25	0.002 384
19/0.75	3.75	8.5	0.65	0.65	0.15	5.45	0.002 137
19/0.80	4.00	9.5	0.65	0.65	0.15	5.70	0.001 878
19/0.85	4.25	10.6	0.65	0.65	0.15	5.95	0.001 664
19/0.90	4.50	11.8	0.65	0.65	0.15	6.20	0.001 484
19/0.95	4.75	13.2	0.65	0.65	0.15	6.45	0.001 332
19/1.00	5.00	15	0.70	0.70	0.15	6.85	0.001 202
19/1.06	5.30	17	0.70	0.70	0.15	7.15	0.001 070
19/1.12	5.60	19	0.75	0.75	0.15	7.50	0.000 958 2
19/1.18	5.90	21.2	0.75	0.75	0.15	7.80	0.000 863 3
19/1.25	6.25	23.6	0.75	0.75	0.15	8.20	0.000 769 3
19/1.32	6.60	26.5	0.80	0.80	0.15	8.70	0.000 689 9
19/1.40	7.00	30	0.80	0.80	0.15	9.10	0.000 613 3

表 5.4-62　　SJV 型绞合铜导体耐水线结构

绞合铜线结构根数/直径（mm）	绞合导体标称直径（mm）	导体标称截面（mm^2）	聚乙氯烯绝缘标称厚度（mm）	成品平均外径上限（mm）	直流电阻最大值（Ω/m）
7/0.80	2.40	3.55	0.60	3.70	0.005 098
7/0.85	2.55	4.00	0.60	3.85	0.004 427
7/0.90	2.70	4.50	0.60	4.00	0.004 028
7/0.95	2.85	5.00	0.60	4.15	0.003 544
7/1.00	3.00	5.6	0.65	4.45	0.003 263
7/1.12	3.36	7.1	0.65	4.80	0.002 601
19/0.63	3.15	6	0.65	4.60	0.003 028
19/0.71	3.55	7.5	0.65	5.00	0.002 384
19/0.75	3.75	8.5	0.70	5.30	0.002 137
19/0.80	4.00	9.5	0.70	5.55	0.001 878
19/0.85	4.25	10.6	0.75	5.90	0.001 664
19/0.90	4.50	11.8	0.75	6.15	0.001 484
19/0.95	4.75	13.2	0.75	6.40	0.001 332
19/1.00	5.00	15	0.75	6.65	0.001 202
19/1.06	5.30	17	0.80	7.05	0.001 070
19/1.12	5.60	19	0.80	7.35	0.000 958 2
19/1.18	5.90	21.2	0.80	7.65	0.000 863 3
19/1.25	6.25	23.6	0.80	8.00	0.000 769 3

表 5.4-63　　SV 型实心铜导体耐水线结构

铜导体标称直径（mm）	导体直径偏差±（mm）	导体标称截面（mm^2）	聚氯乙烯绝缘标称厚度（mm）	成品平均外径上限（mm）	直流电阻（Ω/m）	
					最小值	最大值
0.60	0.006	0.28	0.35	1.40	0.058 76	0.062 22
0.63	0.006	0.31	0.35	1.45	0.053 35	0.056 38
0.67	0.007	0.35	0.35	1.50	0.047 22	0.049 79
0.71	0.007	0.40	0.35	1.55	0.041 98	0.044 42
0.75	0.008	0.45	0.35	1.60	0.037 56	0.039 87
0.80	0.008	0.50	0.35	1.65	0.033 05	0.035 00
0.85	0.009	0.56	0.35	1.70	0.029 25	0.031 04
0.90	0.009	0.63	0.35	1.75	0.026 12	0.027 65
0.95	0.010	0.71	0.35	1.80	0.023 42	0.024 84
1.00	0.010	0.80	0.35	1.85	0.021 16	0.022 40
1.06	0.011	0.90	0.35	1.90	0.018 81	0.019 95
1.12	0.011	1.00	0.35	1.95	0.016 87	0.017 85
1.18	0.012	1.12	0.35	2.05	0.015 19	0.016 09

续表

铜导体标称直径（mm）	导体直径偏差 ±（mm）	导体标称截面（mm^2）	聚氯乙烯绝缘标称厚度（mm）	成品平均外径上限（mm）	直流电阻（Ω/m）	
					最小值	最大值
1.25	0.013	1.25	0.40	2.20	0.013 53	0.014 35
1.30	0.013	1.32	0.40	2.25	0.012 52	0.013 25
1.32	0.013	1.40	0.40	2.25	0.012 14	0.012 85
1.40	0.014	1.60	0.40	2.35	0.010 79	0.011 43
1.50	0.015	1.80	0.40	2.45	0.009 402	0.009 955
1.60	0.016	2.00	0.40	2.55	0.008 237	0.008 749
1.70	0.017	2.24	0.40	2.65	0.007 320	0.007 750
1.80	0.018	2.50	0.45	2.85	0.006 529	0.006 913
1.90	0.019	2.80	0.45	2.95	0.005 860	0.006 204
2.00	0.020	3.15	0.45	3.10	0.005 289	0.005 600
2.12	0.021	3.55	0.45	3.21	0.004 708	0.004 983
2.24	0.022	4.00	0.50	3.45	0.004 218	0.904 462
2.36	0.024	4.50	0.50	3.55	0.003 797	0.004 023
2.50	0.025	5.00	0.50	3.70	0.003 385	0.003 584
2.65	0.027	5.50	0.60	4.05	0.003 014	0.003 190
2.80	0.028	6.18	0.60	4.20	0.002 698	0.002 857
3.00	0.030	7.10	0.60	4.40	0.002 351	0.002 488
3.15	0.032	7.80	0.80	5.00	0.002 131	0.002 258
3.35	0.034	9.00	0.80	5.20	0.001 885	0.001 996
3.55	0.036	10.00	0.80	5.45	0.001 678	0.001 778
3.75	0.038	11.20	0.80	5.60	0.001 504	0.001 593
4.00	0.040	12.50	0.80	5.85	0.001 322	0.001 400

表 5.4-64　　SYJN 型实心铜导体耐水线结构

漆包铜线标称直径（mm）	导体直径偏差 ±（mm）	导体标称截面（mm^2）	交联聚乙烯绝缘标称厚度（mm）	尼龙护套标称厚度（mm）	成品平均外径上限（mm）	直流电阻（Ω/m）	
						最小值	最大值
0.80	0.008	0.50	0.35	0.10	1.80	0.033 05	0.035 00
0.85	0.009	0.56	0.35	0.10	1.85	0.029 25	0.031 04
0.90	0.009	0.63	0.35	0.10	1.90	0.026 12	0.027 65
0.95	0.010	0.71	0.35	0.10	1.95	0.023 42	0.024 84
1.00	0.010	0.80	0.35	0.10	2.00	0.021 16	0.022 40
1.06	0.011	0.90	0.35	0.10	2.10	0.018 81	0.019 95
1.12	0.011	1.00	0.35	0.10	2.15	0.016 87	0.017 85
1.18	0.012	1.12	0.35	0.10	2.30	0.015 19	0.016 09
1.25	0.013	1.25	0.40	0.10	2.40	0.013 53	0.014 35
1.30	0.013	1.32	0.40	0.10	2.45	0.012 52	0.013 25
1.32	0.013	1.40	0.40	0.10	2.45	0.012 14	0.012 85
1.40	0.014	1.60	0.40	0.10	2.55	0.010 79	0.011 43
1.50	0.015	1.80	0.40	0.10	2.65	0.009 402	0.009 955
1.60	0.016	2.00	0.40	0.10	2.75	0.008 237	0.008 749
1.70	0.017	2.24	0.40	0.10	2.85	0.007 320	0.007 750
1.80	0.018	2.50	0.45	0.10	3.05	0.006 529	0.006 913
1.90	0.019	2.80	0.45	0.10	3.15	0.005 860	0.006 204
2.00	0.020	3.15	0.45	0.15	3.35	0.005 289	0.005 600
2.12	0.021	3.55	0.45	0.15	3.45	0.004 708	0.004 983
2.24	0.022	4.00	0.50	0.15	3.70	0.004 218	0.004 462
2.36	0.024	4.50	0.50	0.15	3.80	0.003 797	0.004 023
2.50	0.025	5.00	0.50	0.15	3.95	0.003 385	0.003 584
2.65	0.027	5.50	0.60	0.15	4.30	0.003 014	0.003 190
2.80	0.028	6.18	0.60	0.15	4.45	0.002 698	0.002 857
3.00	0.030	7.10	0.60	0.15	4.85	0.002 351	0.002 488
3.15	0.032	7.80	0.80	0.15	5.00	0.002 131	0.002 258
3.35	0.034	9.00	0.80	0.15	5.40	0.001 885	0.001 996
3.55	0.036	10.00	0.80	0.15	5.60	0.001 678	0.001 778
3.75	0.038	11.20	0.80	0.15	5.80	0.001 504	0.001 593
4.00	0.040	12.50	0.80	0.15	6.05	0.001 322	0.001 400

表 5.4-65 耐水绕组线 20℃时的绝缘电阻 MΩ·km

型号	绝缘电阻	型号	绝缘电阻	型号	绝缘电阻
SQYN SJYN	≥1000	SV SJV	≥500	SYJN SJYJN	≥1000

表 5.4-66 耐水绕组线室温下的耐水压试验

型 号	试验水压（MPa）	型 号	试验水压（MPa）
SQYN、SJYN、SV、SJV	≥1	SYJN、SJYJN	≥1.5

表 5.4-67 耐水绕组线的加速寿命试验

型 号	试验温度（℃）	绝缘标称厚度 δ（mm）	中值寿命（h）
SQYN SJYN	60±2	$\delta \leqslant 0.35$ $0.35 < \delta \leqslant 0.45$ $0.45 < \delta$	≥700 ≥900 ≥1000
SV SJV	60±2	$\delta \leqslant 0.35$ $0.35 < \delta$	≥800 ≥1000
SYJN SJYJN	90±2	$0.35 \leqslant \delta$	≥1000

表 5.4-68 耐水绕组线室温下绝缘层的机械性能

绝缘类型		抗张强度（MPa）	断裂伸长率（%）	备 注
聚氯乙烯	老化前	≥20	≥150	
	老化后	≥20	≥150	80℃ 21d 老化
聚乙烯连带尼龙	老化前	≥10	≥150	
交联聚乙烯	老化前	≥15	≥200	
	老化后	变化率不超过±25%	变化率不超过±25%	90℃ 28d 老化

2.8 聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包圆铜线

聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包圆铜线专用于H级潜油泵的绕组线（以下简称耐油绕组线），目前国内按JB 5331—1991标准制造。耐油绕组线的额定电压至少等于该交流潜油电机的额定电压。

（1）耐油绕组线的型号和产品名称见表5.4-69。

（2）导体规格及其偏差应符合表5.4-70的规定。

（3）导体20℃时的直流电阻应符合表5.4-70的规定。

（4）导体断裂伸长率应符合表5.4-71的规定。

表 5.4-69 耐油绕组线的型号和产品名称

型号	产 品 名 称
MYFE—4	耐电压4kV双层聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包圆铜线
MYFS—7.25	耐电压7.25kV三层聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包圆铜线
MYFS—8.7	耐电压8.7kV三层聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包圆铜线
MYFS—10	耐电压10kV三层聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包圆铜线

表 5.4-70 耐油绕组线导体结构

铜导体标称直径（mm）	导体直径±偏差（mm）	直流电阻（Ω/m）	
		最小值	最大值
1.50	0.015	0.009 402	0.009 955
1.60	0.016	0.008 237	0.008 749
1.70	0.017	0.007 320	0.007 750
1.80	0.018	0.006 529	0.006 913
1.90	0.019	0.005 860	0.006 204
2.00	0.020	0.005 289	0.005 600
2.12	0.021	0.004 708	0.004 983

续表

铜导体标称直径（mm）	导体直径±偏差（mm）	直流电阻（Ω/m）	
		最小值	最大值
2.24	0.022	0.004 218	0.004 462
2.36	0.024	0.003 797	0.004 023
2.50	0.025	0.003 385	0.003 584
2.65	0.027	0.003 014	0.003 190
2.80	0.028	0.002 698	0.002 857
3.00	0.030	0.002 351	0.002 488
3.15	0.032	0.002 131	0.002 258
3.35	0.034	0.001 885	0.001 996
3.55	0.036	0.001 678	0.001 778
3.75	0.038	0.001 504	0.001 593
4.00	0.040	0.001 322	0.001 400
4.25	0.043	0.001 171	0.001 240
4.50	0.045	0.001 045	0.001 106
4.75	0.048	0.000 987	0.000 998
5.00	0.050	0.000 846	0.000 896

表 5.4-71 耐油绕组线导体断裂伸长率

导体标称直径 d（mm）	断裂伸长率（%）
$d \leqslant 3.00$	≥25
$3.00 < d \leqslant 5.00$	≥30

（5）最里层采用双面复合薄膜（FHF）搭盖绕包，其余采用单面复合薄膜（HF）搭盖绕包。各层绕包方向相同，应避免搭缝的重合，绕包层经高温烧结后粘成整体。绝缘表面应光洁，无气泡、分层和翘边。绝缘厚度应符合表5.4-72的规定。

（6）绝缘外径由供需双方协商确定，在不超过最大外径的前提下，允许绝缘厚度超过正偏差。在薄膜连接处的绝缘厚度允许超过0.10mm。

（7）成品的柔韧性试验，按表5.4-73规定的圆棒上卷绕后，绝缘不应开裂和分层。

（8）成品热冲击试验，按表5.4-73规定的圆棒上卷绕，并在不低于200℃温度处理后，绝缘不应开裂和分层。

（9）成品的附着性用切割拉伸法试验，在拉伸10%的条件下，切割处露铜距离应不大于表5.4-74的规定。

（10）成品的扭转试验，按表5.4-74的规定扭转后，绝缘层薄膜间分离部分的最大深度不超过绕包线圆周长的二分之一。

表 5.4-72 耐油绕组线绝缘厚度及偏差

型 号	绝缘标称厚度（mm）	偏差（mm）
MYFE—4	0.36	±0.06
MYFS—7.25	0.54	±0.08
MYFS—8.7	0.63	±0.09
MYFS—10	0.72	±0.11

表 5.4-73 耐油绕组线柔韧性和热冲击卷绕棒径

导体标称直径 d（mm）	试棒直径（mm）
$d \leqslant 3.00$	$4d$
$3.00 < d \leqslant 5.00$	$5d$

表 5.4-74 耐油绕组线附着性和扭转次数

导体标称直径 d（mm）	露铜距离（mm）	扭转次数
$d \leqslant 2.500$	$4d$	直到绕包螺旋线展开成直线
$2.500 < d \leqslant 3.000$	$4d$	20
$3.000 < d \leqslant 4.000$	$3d$	15
$4.000 < d \leqslant 5.000$	$3d$	10

（11）成品可以连续通过长形水槽或浸入水槽内进行交流电压试验，保持施压1min，试验电压按表的规定，绕组线不应击穿。

（12）成品的交流电压击穿试验，试样长度为1.5m，取3根试样浸入水槽内，二端伸出水面适当长度。升压速度为1kV/s，击穿电压应不低于表5.4-75的规定。

（13）成品经耐油水试验后，其交流击穿试验电压应不低于表5.4-75的规定。油水混合液的成分为：含自来水3%；HU—20或HU—30汽轮机油97%。取3根1.5m导航的试样，放置于灌满混合液的密封容器内，试验温度为180℃±5℃，试验压力为20 MPa±2 MPa，时间为7d。试验结束后将密封容器冷却到室温，取出试样，在1h内完成击穿试验。

表5.4-75　　耐油绕组线耐电压和击穿试样

型　号	交流电压试验（kV）	交流击穿电压（kV）	经油水试验后交流击穿电压（kV）
MYFE—4	4	10	0.8
MYFS—7.25	7.2	15	1.2
MYFS—8.7	8.7	18	14.4
MYFS—10	10	21	16.8

2.9　200级聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包铜扁线

200级聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包铜扁线是一种比较新型的绕组线（以下简称复合薄膜绕包线），由于薄膜价格较贵，仅局限于某些特殊电机和电器采用。目前按JB 6757—1993标准制造。

（1）复合薄膜绕包线的型号和产品名称见表5.4-76。

（2）导体及其要求基本与玻璃丝包铜扁线相同。

（3）复合薄膜绕包线导体断裂伸长率见表5.4-77。

（4）复合薄膜绕包线的绝缘厚度见表5.4-78。

（5）复合薄膜绕包线的导体直流电阻要求与玻璃丝包线相同。

表5.4-76　　复合薄膜绕包线的型号和产品名称

型　号	产　品　名　称
MYFB	200级单层聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包铜扁线
MYFEB	200级双层聚酰亚胺—氟46复合薄膜绕包铜扁线

表5.4-77　　铜扁导体伸长率

扁导体窄边标称尺寸 a（mm）	伸长率不小于（%）
$a\leqslant 2.50$	30
$2.50<a\leqslant 5.60$	33

表5.4-78　　复合薄膜绕包线的绝缘厚度　　mm

绝缘厚度序号	最小绝缘厚度（$A-a$）		最大绝缘厚度			
	MYFB	MYFEB	MYFB（$B-b$）	MYFB（$A-a$）	MYFEB（$B-b$）	MYFEB（$A-a$）
1	0.100	0.200	0.130	0.140	0.260	0.280
2	0.130	0.260	0.170	0.180	0.330	0.350
3	0.170	0.340	0.220	0.230	0.440	0.460
4	0.210	0.430	0.280	0.290	0.550	0.570
5	0.260	0.510	0.330	0.340	0.660	0.680

注　（$B-b$）不考核。

（6）复合薄膜绕包线的最大回弹角不大于5°。

（7）复合薄膜绕包线的弯曲性能，应分别在4倍宽边和4倍窄边尺寸的试棒上进行弯曲，绝缘应不开裂和分层。

（8）复合薄膜绕包线的附着性，对于单层绕包线拉伸15%；对于双层绕包线拉伸10%后，绝缘失去附着性的长度应不大于1b。

（9）击穿电压试验应取两个绕包线试样，将其宽边在4倍窄边尺寸的圆棒上弯曲成S形，对两个S形试样进行4点击穿电压试验，试验结果（钢珠法）应不低于表5.4-79规定的数值。

表5.4-79　　复合薄膜绕包线的击穿电压

绝缘厚度序号	扁导体窄边标称尺寸 a（mm）	交流击穿电压（kV）	
		单层薄膜绕包线	双层薄膜绕包线
1	$a\leqslant 3.00$	2.0	3.0
2		2.5	4.0
3		3.0	5.0
4		3.5	6.0
5		4.0	7.0
1	$3.00<a\leqslant 5.60$	1.5	2.5
2		2.0	3.0
3		2.3	3.5
4		2.6	4.2
5		3.0	5.0

（10）复合薄膜绕包线的表面应光洁平整，无气泡、分层和翘边。

（11）复合薄膜绕包线的耐热性评定，外推200℃寿命不应低于20 000h。或最低试验温度的寿命不低于5000h。

2.10　无机绝缘绕组线

无机绝缘绕组线用于特种仪器仪表的线圈等，主要有玻璃膜绝缘微细线、氧化膜铝线及带（箔）和陶瓷绝缘线3种。

（1）玻璃膜绝缘微细线。玻璃膜绝缘微细线是用于特种仪表中，是含铁量极微的无磁性绕组线。它是在合金导体外面套上玻璃管，在高温下拉制成。其型号和尺寸见表5.4-80，性能见表5.4-81。

表5.4-80　　玻璃膜绝缘微细线型号和尺寸

型　号	导线平均直径（μm）	允许公差（%）	绝缘线平均外径（%）
BMTM—1	6	±20	16～20
BMTM—2	7～8	±20	16～20
BMTM—3	不规定	不规定	不规定
BMNG	2～5	—	16～20

表5.4-81　　玻璃膜绝缘微细线性能

试验项目	电气性能				膜的弹性	线拉断力不小于/N	针孔试验
	BMTM—1	BMTM—2	BMTM—3	BMNG			
电阻温度系数 $\lvert\alpha\rvert\times10^{-5}$（$K^{-1}$）	2	3	5	$\leqslant$2.5	在0.049N拉力下，绕于半径1.0mm的轴上，玻璃膜应不破裂	0.118	无针孔
$\lvert\beta\rvert\times10^{-8}$（$K^{-1}$）	<1	<1	<1	$\leqslant$0.6			
每轴线的绝缘电阻（MΩ）	>2	>2	>10	>50			
耐工频击穿电压（V）	>1000	>1000	>1000	>1000			

（2）氧化膜铝线及带（箔）。氧化膜铝线及带（箔）是用电解阳极氧化法制造，在铝线及带（箔）表面生成一层致密的三氧化二铝（Al_2O_3）膜而成。用氧化膜铝箔制造电器等，可简化绝缘结构和绕制工艺，未经绝缘漆密封的氧化膜能承受的电压梯度很小，所以设计电机和电器时，层间电压不能太高。尺寸为 0.46（厚）×50（宽）mm 不经浸漆处理的氧化膜铝带，加热到 350℃经 48h 后，其击穿电压为 180～220V。氧化膜铝带也具有一定的耐弯曲性，将其在直径 50mm 的圆棒上弯曲，铝带两端悬挂 3.8kg 重物，其击穿电压值仍保持在 200V 左右。在室温和相对湿度 65%时，氧化膜铝带的绝缘电阻可满足一般设计要求，但湿度增加会使绝缘电阻降低，所以常需要浸漆处理。氧化膜铝带需要专用的冷压连接工艺进行连接。

（3）陶瓷绝缘线的性能。陶瓷绝缘线系在导线上浸涂玻璃瓷浆后经烘炉烧结而成。长期使用温度可达 500℃。如采用铜线为导体，在此温度下，铜线将氧化，故一般采用镀镍铜线、镍包铜线或不锈钢包铜线为导体。镍层较薄的镍包铜线（镍的质量分数为 10%）可在 400℃及以下使用；镍层较厚的镍包铜线（镍的质量分数为 20%）可在 500℃及以下使用。陶瓷绝缘线还有极好的耐辐射性能，适宜在高能物理、宇宙航空等领域中应用。陶瓷绝缘线耐卷绕而不裂的线径倍率一般为 30 倍左右；在较干燥条件下，陶瓷绝缘线在直径 4mm 的圆铜棒上卷绕 3 圈，其击穿电压为 220V 左右，在 75%湿度条件下的击穿电压为 170～190V，在 100%湿度条件下的击穿电压为 90～100V。由于单一陶瓷绝缘线在高湿度条件下击穿电压下降幅度较大，因此不推荐在高湿条件下使用，为了改善其耐潮性能，可采用有机材料加以密封，其长期工作温度取决于所用密封材料的耐热性能。

3 绕组线的试验

绕组线的试验分例行试验、抽样试验和型式试验。为便于查阅，将绕组线试验项目汇总于表 5.4-82 中 。从表 5.4-82 可知：

（1）绕组线的例行试验项目较少，多数品种只需检验表面质量和包装。潜水电机用绕组线和潜油电机用绕组线需进行耐电压试验。

（2）绕组线抽样试验项目较多，并且是工厂自行对产品质量控制的重要环节，用户大批订货时也常要求协商抽样数量，并作为验收依据。

（3）绕组线型式试验项目，除少数比较特殊性能外，大致与抽样试验相同。在新品种开发时，有些试验带有研究性质，待积累数据并定量后，常作为型式试验项目。

几十年前，国际上对漆包线的耐温等级评定观点不一致，现在则基本统一了方法和指标。再如变频电机用漆包线，需进行 20kHz 脉冲寿命试验、电压寿命试验和电晕起始电压等，均属比较特殊的型式试验。

表 5.4-82 绕组线试验项目汇总表

序号	试验项目	试验性质	试验方法	备注
1	表面质量检查	R	正常目力	
2	结构尺寸检查	T，S	GB 4074	
2.1	导体尺寸	—	—	
2.2	绝缘厚度	—	—	
2.3	护套厚度	—	—	
2.4	外形尺寸	—	—	
3	导体电阻	T，S	GB 3408	
4	导体断裂伸长率	T，S	GB 4074	
5	回弹角	T，S	GB 4074	
6	柔韧性和附着力	T，S	GB 4074	
6.1	卷绕或弯曲	—	—	
6.2	拉伸	—	—	
6.3	急拉断	—	—	
6.4	剥离扭绞	—	—	
7	热冲击	T，S	GB 4074	
8	软化击穿	T，S	GB 4074	未注明
9	刮漆	T，S	GB 4074	试验方法
10	耐溶剂	T，S	GB 4074	的项目，
11	击穿电压	T，S	GB 4074	其试验方
11.1	室温击穿电压	—	—	法应按产
11.2	高温击穿电压	—	—	品标准规
12	漆膜连续性	T	GB 4074	定进行
13	耐热性（温度指数）	T	GB 4074	
14	耐冷冻剂	T，S	GB 4074	
15	直焊性	T，S	GB 4074	
16	热粘合和溶剂粘合	T，S	GB 4074	
17	介质损失角正切	T，S	GB 4074	
18	耐含水变压器油	T，S	GB 4074	
19	失重	T，S	GB 4074	
20	高温失效	参考试验	GB 4074	
21	绝缘电阻（挤包绝缘耐水线）	T，S	GB 3408	
22	耐电压试验（挤包绝缘耐水线）	T，S	GB 3408	
23	耐水压试验（挤包绝缘耐水线）	T	见备注	
24	绝缘机械性能（挤包绝缘耐水线）	T	见备注	
25	加速寿命（挤包绝缘耐水线）	T	见备注	
26	耐气轮机油水（潜油泵用绕组线）	T	见备注	
27	包装	R	正常目力	

第 5 章　电气装备用电线及电缆

电气装备用电线及电缆包括很多不同的产品，有时称线，有时称缆，其实电线和电缆没有严格的分界定义，常以尺寸较小或结构简单的称之为电线，反之则称之为电缆。本章所述的几十种产品，均属电缆行业的习惯命名，大部分产品具有结构上的共性，而用途和功能上却各有个性，较难对这一大类产品赋予确切和完整的定义，因为电气装备用电线电缆属于各种装备和系统工程的配套产品，以前认为不适宜划分为裸线、电力电缆、通信电缆、绕组线的产品，绝大多数产品就归并于电气装备用电线电缆。20 世纪 50 年代，中国机电制造业比较落后，电气装备用电线电缆的配套尚未达到专业化程度，当时也没有迫切要求发展这类专用电线电缆，也不具备条件形成这一大类产品。当时中国市场上这方面仅有 5 个品种可选用：①天然橡皮绝缘、蜡纱线编织电线，俗称花线，早年室内小型吊灯大量使用花线，现在仍大量用于电热类家用电器，如电熨斗等。②天然橡皮绝缘、棉纱编织、涂沥青电线，过去大量用于室内外低压配电，现在国际上完全淘汰，国内仍有极少量保留。③纱包或丝包绝缘、外加棉纱编织，再浸石蜡防潮的安装线，早年用于无线电等电讯器材内部接线，现已淘汰。④天然橡皮绝缘、棉纱编织、涂蜡克漆（烘烤固化）电线，有一定防潮性，用于汽车、飞机等装备内部布线，现已淘汰，但还有个别订货。⑤天然橡皮绝缘、天然橡皮护套软电缆，用于室内外作业，在室外使用的寿命很短。除此以外国内极少量生产聚氯乙烯绝缘软电线，其质量较差，不能保证安全使用，实在不得已只能少量进口。

电气装备用电线电缆从 20 世纪 60 年代开始渐进，经历了计划经济时期，其间“以塑代铅”和“以合成橡胶代天然橡胶”等技术措施，有力地推动了技术进步。到 20 世纪 70 年代末，呈现突飞猛进，如今已发展成为一类单独配套性产品。正因为是配套性质，并非每一品种都具有稳定的市场，其销售有赖于其他工业的兴衰。电气装备用电线电缆的产值曾经一度领先，其产值份额超过电线电缆总值的 35%，但近 10 年来电力和通信建设的高速增长，电气装备用电线电缆产值的占有率从 20 世纪 90 年代起开始下降，历年来大致保持 25%～30% 之间。但品种数仍占线缆品种总数的 38% 左右。

不同使用场合对电线电缆性能要求差异很大，如高温、低温、纵向或径向压力密封性（气体、潮气或水）、紫外线、臭氧、润滑油或燃料油、特种溶剂、弯曲、曲绕、抗拉、抗压、抗振、抗扭、强电或强磁干扰、电晕、辐射、阻燃、耐火等等，有时某些因素可能是叠加的。针对这些复杂的外界因素，在新产品试制时的材料选用、结构设计、工艺技术以及试验方法等方面，需要各方面兼顾，周密考虑产品性能指标和考核其可靠性，以保证电线电缆使用的有效寿命。

1　电气装备用电线及电缆的基本结构

导体、绝缘和护套（或护层）是大多数电气装备用电线电缆的基本组成部分，有些产品没有护套，但其绝缘应具有适当的保护功能，另一些产品需要有屏蔽层，少数产品需有铠装。

1.1　导体

电气装备用电线电缆导电线芯与电力电缆一样，也是采用 GB/T 3956—1997《电缆的导体》标准，该标准规定了多种导体结构，电气装备用电线电缆导电线芯则选用其中的第 1 种实心导体、第 2 种绞合圆形导体、第 5 种软铜导体和第 6 种也是铜软导体，但其单线直径比第 5 种更细。前两种适用于固定敷设，第 5 种可移动使用，第 6 种可频繁移动使用。导体的结构和电阻要求，见表 5.5-1～表 5.5-4。第 2 种导体一般采用正规绞合，自里向外，每层单线数递增 6 根，每层绞向相反，如 19 根单线组成的导体，由 1+6+12 根单线绞成，第 5 种和第 6 种导体，因单线根数很多，通常采用单向束线绞合，必要时采用复合绞合。表 5.5-1 中“不镀金属”是指光亮退火铜线，“镀金属”一般是指镀锡铜线，有些特种产品，需要镀银或镀镍。“成型导体”是指扇形、矩形和半圆形等导体，仅少数低压电缆采用。表 5.5-1～表 5.5-4 的规定，并不包括所有电线电缆品种的导体结构，某些产品的导体结构自成系列。此外由于 GB/T 3956—1997 包含了电力电缆用导体，有些规格不适合电气装备用电线电缆应用，所以下列各导体结构表中，将该标准中部分规格删除。

当测量电阻时导体温度不等于 20℃时，测量值需乘以表 5.5-5 系数 k 进行校正。

表 5.5-1　　单芯和多芯电缆用第 1 种实心导体

标称截面（mm^2）	20℃时导体最大电阻（Ω/km）		
	圆铜导体		圆或成型铝导体
	不镀金属	镀金属	
0.5	36.0	36.7	—
0.75	24.5	24.8	—
1	18.1	18.2	—
1.5	12.1	12.2	18.1
2.5	7.41	7.56	12.1
4	4.61	4.70	7.41
6	3.08	3.11	4.61
10	1.83	1.84	3.08
16	1.15	1.16	1.91
25	0.727	—	1.20
35	0.524	—	0.868
50	0.387	—	0.641

表 5.5-2　　单芯和多芯电缆用第 2 种绞合导体

标称截面（mm^2）	导体中单线最少根数						20℃时导体最大电阻（Ω/km）		
	非紧压圆形导体		紧压圆形导体		成型导体		铜		铝
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	不镀金属	镀金属	
0.5	7	—	—	—	—	—	36.0	36.7	—
0.75	7	—	—	—	—	—	24.5	24.8	—
1	7	—	—	—	—	—	18.1	18.2	—
1.5	7	—	6	—	—	—	12.1	12.2	—
2.5	7	—	6	—	—	—	7.41	7.56	—
4	7	7	6	—	—	—	4.61	4.70	7.41
6	7	7	6	—	—	—	3.08	3.11	4.61
10	7	7	6	—	—	—	1.83	1.84	3.08
16	7	7	6	6	—	—	1.15	1.16	1.91
25	7	7	6	6	6	6	0.727	0.734	1.20
35	7	7	6	6	6	6	0.524	0.529	0.868

续表

标称截面（mm²）	导体中单线最少根数						20℃时导体最大电阻（Ω/km）		
	非紧压圆形导体		紧压圆形导体		成型导体		铜		铝
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	不镀金属	镀金属	
50	19	19	6	—	6	6	0.387	0.391	0.641
70	19	19	12	12	12	12	0.268	0.270	0.443
95	19	19	15	15	15	15	0.193	0.195	0.320
120	37	37	18	15	18	18	0.153	0.154	0.253
150	37	37	18	15	18	18	0.124	0.126	0.206
185	37	37	30	30	30	30	0.099 1	0.100	0.164
240	61	61	34	30	34	34	0.075 4	0.076 2	0.125
300	61	61	34	30	34	34	0.060 1	0.060 7	0.100
400	61	61	53	53	53	53	0.047 0	0.047 5	0.077 8
500	61	61	53	53	53	53	0.036 6	0.036 9	0.060 5
630	91	91	53	53	53	53	0.028 3	0.028 6	0.046 9
800	91	91	53	53	—	—	0.221	0.022 4	0.036 7
1000	91	91	53	53	—	—	0.017 6	0.017 7	0.029 1

表 5.5-3　　单芯和多芯电缆用第5种软铜导体

标称截面（mm²）	导体中单线最大直径（mm）	20℃时导体最大电阻（Ω/km）	
		不镀金属	镀金属
0.5	0.21	39.0	40.1
0.75	0.21	26.0	26.7
1	0.21	19.5	20.0
1.5	0.26	13.3	13.7
2.5	0.26	7.98	8.21
4	0.31	4.95	5.09
6	0.31	3.30	3.39
10	0.41	1.91	1.95
16	0.41	1.21	1.24
25	0.41	0.780	0.795
35	0.41	0.554	0.565
50	0.41	0.386	0.393
70	0.51	0.272	0.277
95	0.51	0.206	0.210
120	0.51	0.161	0.164
150	0.51	0.129	0.132
185	0.51	0.106	0.108
240	0.51	0.080 1	0.081 7
300	0.51	0.064 1	0.065 4
400	0.51	0.048 6	0.049 5
500	0.61	0.038 4	0.039 1
630	0.61	0.028 7	0.029 2

表 5.5-4　　单芯和多芯电缆用第6种软铜导体

标称截面（mm²）	导体中单线最大直径（mm）	20℃时导体最大电阻（Ω/km）	
		不镀金属	镀金属
0.5	0.16	39.0	40.1
0.75	0.16	26.0	26.7
1	0.16	19.5	20.0
1.5	0.16	13.3	13.7
2.5	0.16	7.98	8.21
4	0.16	4.95	5.09
6	0.21	3.30	3.39
10	0.21	1.91	1.95
16	0.21	1.21	1.24
25	0.21	0.780	0.795
35	0.21	0.554	0.565
50	0.31	0.386	0.393
70	0.31	0.272	0.277
95	0.31	0.206	0.210
120	0.31	0.161	0.164
150	0.31	0.129	0.132
185	0.41	0.106	0.108
240	0.41	0.081 0	0.081 7
300	0.41	0.064 1	0.065 4

表 5.5-5　　铜、铝电阻温度校正系数

测量时导体温度（℃）	校正系数 k	测量时导体温度（℃）	校正系数 k
5	1.064	21	0.996
6	1.059	22	0.992
7	1.055	23	0.988
8	1.050	24	0.984
9	1.046	25	0.980
10	1.042	26	0.977
11	1.037	27	0.973
12	1.033	28	0.969
13	1.029	29	0.965
14	1.025	30	0.962
15	1.020	31	0.958
16	1.016	32	0.954
17	1.012	33	0.951
18	1.008	34	0.947
19	1.004	35	0.943
20	1.000	—	—

1.2 绝缘

绝缘厚度的设计取决于机械强度、外径限制和材料选择等因素。电缆在制造、安装和使用过程中，如果不能抵御外力而出现绝缘破损，则丧失或降低了耐电场强度的能力，因此机械强度是低压电缆确定绝缘厚度的首要因素。厚度尺寸与导体直径相关，直径越大则绝缘受损的可能性也越大，所以直径增大则厚度需增厚。当某些电缆严格规定外径上限时，绝缘厚度也受到制约，此时需要选择力学性能较高的材料来满足绝缘的机械强度要求。1kV及以下的电线电缆，电压等级不是确定绝缘厚度的主要因素，但为了轻便，对300/500V和300/300V等级的标称绝缘厚度比450/750V等级略有减小。

绝缘的电气、力学、理化等性能主要取决于材料选择，当材料不能完全满足电缆全部性能要求时，可从结构上加以补偿。常用电缆的绝缘厚度见表5.5-6。但一些向轻小型化发展的产品，则趋向采用薄绝缘和超薄绝缘厚度，如汽车低压电线和航空电线等。

表 5.5-6　　常用电缆的绝缘厚度

导体标称截面（mm²）	聚氯乙烯		交联聚乙烯	乙丙橡胶	
	450/750V绝缘电线（mm）	600/1000V船用电力电缆（mm）	600/1000V船用电力电缆（mm）	450/750V橡套软电缆（mm）	600/1000V船用电力电缆（mm）
1.0	—	0.8	0.7	—	1.0
1.5	0.7	0.8	0.7	0.8	1.0
2.5	0.8	0.8	0.7	0.9	1.0
4	0.8	1.0	0.7	1.0	1.0
6	0.8	1.0	0.7	1.0	1.0
10	1.0	1.0	0.7	1.2	1.0
16	1.0	1.0	0.7	1.2	1.0
25	1.2	1.2	0.9	1.4	1.2
35	1.2	1.2	0.9	1.4	1.2
50	1.4	1.4	1.0	1.6	1.4
70	1.4	1.4	1.1	1.6	1.4
95	1.6	1.6	1.1	1.8	1.6
120	1.6	1.6	1.2	1.8	1.6
150	1.8	1.8	1.4	2.0	1.6
185	2.0	2.0	1.6	2.2	1.8
240	2.2	2.2	1.7	2.4	2.0
300	2.4	2.4	1.8	2.6	2.2
400	2.6	2.6	2.0	2.8	2.4

注　天然—丁苯橡胶绝缘基本淘汰，其绝缘厚度与乙丙橡胶相等。

1.3　金属屏蔽

电气装备电线电缆的金属屏蔽有单元屏蔽和总屏蔽。单元是指电缆内线对或线组的屏蔽，单元屏蔽的功能是防止单元组件之间干扰。总屏蔽的功能是防止外界电磁场对缆芯的干扰，也可以抑制缆芯对外界电磁波的发射。有些设备不但需要信息传输，还需要小功率馈电和机电控制，在一根电缆内，包含动力、控制和信号等多种功能，为了使各路互不干扰，传输信号（模拟型或数字型）的线组需要有单元屏蔽。

常用的单元屏蔽结构有 3 种：

（1）铜线或镀锡铜线编织，也可在线组外先搭盖绕包一层聚酯薄膜，然后再编织。必要时在编织后搭盖绕包一层聚酯薄膜。编织屏蔽密度一般为 85%，覆盖率大致也为 85% 。

（2）在线组外正向缠绕一层细铜线或镀锡铜线，再反向缠绕一根涤纶纱线扎紧。这种结构适用于软电缆。铜线缠绕屏蔽的覆盖率可接近 100%。

（3）线组外搭盖绕包一层聚酯薄膜一铝（或铜）箔复合带，除用户要求外，铝箔面一般向里，绕包时沿纵向放置一根镀锡铜绞线作为引线，其截面一般不小于 0.5mm^2，以保持屏蔽层的连续性，必要时再搭盖绕包一层聚酯薄膜，这样各屏蔽相互完全绝缘，可符合单元屏蔽必须一点接地的系统要求。

总屏蔽结构通常用镀锡铜线总编织，编织密度一般不低于 85%。对于成缆直径较大的产品，可以绕包铜带，并附加稀疏缠绕铜线。对总屏蔽要求很高的电缆，可用铝套、轧纹铜管或接近 100%覆盖率的缠绕铝线，如铁道信号电缆、导引电缆和变频电缆等。

1.4　护套

护套主要保护绝缘不受损伤，其厚度是根据挤包橡塑护套前缆芯直径的假定值来计算，计算方法可查阅电缆护层或产品标准，不同材料的计算系数不等，计算数值有所差异。并且假定值与实际值存在误差，也会影响电缆外径。因此很多产品标准已将护套厚度列入产品结构表，大部分新设计的产品，也可参考类似产品直接套用。并非所有产品的护套，都是按电缆护层标准的公式计算确定的，因为很多用户既对性能参数要求很严，又对电缆外径及其公差有限制，所以对一些专用产品和难度较高的新产品开发，对其护套结构设计和工艺控制都有严格的限制，而这些产品的标准和规范中，常列出完整的结构表。常用护套材料有聚氯乙烯、聚乙烯、无卤低烟聚烯烃、各种橡皮和交联聚烯烃等。

1.5　铠装

使用时需要承受一定机械力的电缆，需要考虑合适的铠装：

（1）单层镀锌细钢线铠装能承受一定拉力，如用于轻型水文探测电缆等。此时还需要选择适当的钢丝品种，应满足强度、可挠度和回弹性能等。

（2）镀锌高碳钢丝双层钢丝铠装具有能够承受高负重的特性，应用于大长度地质勘探电缆。

（3）扁电缆自锁式镀锌钢带铠装，电缆有一定耐振性和减少流体阻力的作用，用于深井油泵电缆。

（4）镀锌薄钢带蛇皮管式铠装有一定的抗压能力和抗刺穿性，用于室内布线，不需穿管，允许埋入墙内或放入槽内。

（5）密封型轧纹铜管，外挤包塑料护套，不但有一定的抗压能力，还具有优良的屏蔽性能，用于变频电缆。

1.6　加强构件

有些电缆使用时需要受一定的拉力和弯曲，当外钢丝铠装结构不适合这种工作条件时，可在电缆中心放置较柔软抗拉构件。这些构件由细钢丝绞合芯（如电梯电缆）、芳伦纤维以及碳纤维等材料构成。

1.7　常用的绝缘和护套材料的选择和比较

电气装备电线电缆常用橡胶与塑料，分为 4 类：即热塑性软塑料，如聚氯乙烯；热固性软塑料，如交联聚烯烃；热固性弹性体，如天然橡皮；热塑性弹性体，如聚氨酯。

聚氯乙烯软塑料是工艺最简便的绝缘和护套材料，其机械和电气性能良好，有较好的耐酸、耐碱、耐化学品和耐潮性，不延燃，成本较低。聚氯乙烯电缆料最初只有 3 个品种，现在已发展到 30 多个品种，需求量经久不衰。

丁腈—聚氯乙烯复合物是用丁腈橡胶（或丁腈橡胶粉）作为增塑剂，其低温柔软性能良好，与热塑弹性体有些相似，而价格大大低于其他优良的热塑弹性体、是小型电器移动连接线常用的绝缘材料。

聚乙烯分高密度、中密度、低密度、线性低密度等品种，其电气性能优越，耐潮、耐寒，机械性能适中，装备线缆中主要用于计算机电缆等绝缘。

交联聚乙烯是近 20 年来大量应用的绝缘材料，有辐照交联、硅烷交联、干法和湿法交联等。这些交联方法的设备、工艺差异很大，各有适用产品的范围。装备线缆绝缘厚度较薄，辐照和硅烷交联用得较多，也可用湿法交联。

聚乙烯的改性或者乙烯的共聚体，如 EVA、EEA、EMA、EBA、EAA、EMAA 等，适当的配方可改进对氢氧化铝和氢氧化镁受容性，是低烟无卤阻燃绝缘和护套的重要基材，可制成热塑型和交联型二类低烟无卤阻燃料。尽管低烟无卤阻燃料目前并未达到理想水平，但仍是当前的主导品种。

聚丙烯物理机械性能优于聚乙烯，电性与聚乙烯相当。为提高挤出性能，可加少量能与其共混的橡胶改性。聚丙烯可用于油井电缆绝缘。

聚酰胺塑料也就是尼龙，其耐磨和抗切割性很好，耐寒、耐热、耐油、耐溶剂较好，挤出厚度可很薄，主要用于薄护层。常用牌号为尼龙 6 和尼龙 1010 ，后者有一定的防止白蚁蛀孔和老鼠咬损的效能。

聚对苯二甲酸丁醇酯（PBT）是 20 世纪 70 年代发展起来的，其特点是热变形温度高，在 150℃空气中可长期工作，具有低的吸湿性，电性优良，机械性能较好，某些方面与尼龙（PA—12）相似。PBT 最初只作为工程塑料应用，在发展初期，PBT 的屈服强度为 55～61N/mm^2，屈服点的伸长率为 6.5%～9%，比尼龙更好。近期 PBT 经改性后提高了其柔软性，屈服强度为 27N/mm^2，屈服点的伸长率达 25%，适用要求较软的光纤二次被覆松套管。由于 PBT 加工方便，价格比尼龙低，且硬度比 PA-12 更硬，有防蚁和防鼠效应，可以制造绝缘较薄的电线，是一种无卤自熄材料，可通过 UL 94 中 V-2 垂直燃烧试验，而且电线比较柔软，适合安装电线绝缘。

氯化聚醚电性良好，耐油和耐溶剂性仅次于氟塑料，但抗冲击差，伸率低，需加增塑剂、如添加氯化聚乙烯或丁腈橡胶，可用于与多种油品接触的电线绝缘。

氟塑料分子结构中含氟碳键，键能高，是目前耐热和耐溶剂性最好的塑料，氧指数很高，阻燃性强。氟塑料品种较多，有塑料王之称。如聚四氟乙烯（F4）、聚全氟乙丙烯（F46）、可融性聚四氟乙烯（PFA）、四氟乙烯－乙烯共聚物（F40）和辐照交联 F40 等，近期辐照交联 F40 绝缘电线在航空、油井、机车、汽车、计算机、家电等方面被广泛使用。

聚醚砜（PES）具有较好的耐热性，工作温度为 180～200℃，高弹性模量、无毒、阻燃自熄性好，可挤出成型，适用于特种电线。

聚醚醚酮（PEEK）具有很好的耐热性，工作温度为 250℃，吸水性极低，阻燃自熄性好，可挤出成型，适用于特种电线。

聚氨酯弹性体具有优异的耐磨、耐油、耐化学品、耐候、耐辐射、抗撕、高强度、高弹性、高伸率、高模量、易着色、容易加工，这些综合性能是目前任何商品橡胶和塑料不全具备的，是电缆的理想护套材料，有适应全天候条件之称。

乙烯醋酸乙烯酯共聚物按其醋酸乙烯（VA）含量的不同，可分为热塑性、弹性体和热塑弹性体 3 种：EVA 的 VA 含量在 18%～27%之间，用来改善聚乙烯性能，也用于无卤低烟阻燃料和半导电屏蔽料等。EVM 的 VA 含量在 40%～80%之间，为硫化型弹性体，常用于低压电线绝缘及护套。PVA 的 VA 含量在 80%以上，为热塑弹性体，线缆产品不用。

乙丙橡胶和聚丙烯共混热塑弹性体是一种综合性能优良的绝缘和护套材料，它的制造过程中应用了动态硫化工艺，使完全硫化的橡胶颗粒全部分散在由热塑性材料构成的连续基质中，橡胶颗粒的大小为 1mm 或更小，这样就有极好的物理性能。因为价格较贵，目前国内没有大量应用。

天然橡胶成分是聚异戊二烯，由于分子结构中含双键，耐热老化、耐紫外线、耐臭氧、耐油和耐溶剂都较差，易燃。主要用于低压电线电缆的绝缘和护套。过去常出现橡皮发粘和铜线变黑，配方中加铜抑制剂能有所改善，目前有应用导体浸涂法，使铜线表面形成很薄的抗铜催化薄层，效果甚好，更简单而有效的方法是用棉纸纵包或绕包隔离层，完全不与铜导体接触。

丁苯橡胶由丁二烯和苯乙烯共聚而成，苯乙烯含量约 29%，丁苯橡胶延伸时缺乏结晶性，抗张强度很低，加补强剂后能显著提高，与天然橡胶相比，耐磨、耐热略好，弹性稍差，常与天然橡胶并用。主要用于电线电缆的绝缘和护套。

丁基橡胶由异丁烯和少量异戊二烯共聚而成，分子结构中双键少，耐热、耐臭氧和耐电晕性、气密性好，吸水性低，电性优良。缺点是硫化困难、强度低、弹性小、不耐矿物油。过去常用于 35kV 及以下电力电缆和船用电缆的绝缘，现已被乙丙橡胶替代。

三元乙丙橡胶是乙烯和丙烯并引入非共轭二烯第 3 单体的共聚物，丙烯含量为 40 克分子数左右。乙丙橡胶虽机械强度较低，但耐热性和电气性能很好，尤其有优越的抗电树性，能用于 154kV 及以下的电力电缆、矿用电缆、船用电缆、控制电缆、测井电缆、电机引接线等产品的绝缘。其特殊配方可用于电缆附件的部件。

氯丁橡胶为 2-氯丁二烯的聚合物，因为分子结构中含氯，故耐候性、耐油性较好，且阻燃，但电性很差。主要用于户外电线电缆、船用电缆和矿用电缆的护套，也可作电焊机电缆的护套兼绝缘。

丁腈橡胶为丁二烯和丙烯腈的共聚物，其丙烯腈含量为 25%～35%（分 3 级），分子结构中含 CN 基团，含量越高，耐油和耐溶剂性、耐热性、耐磨性越好，而弹性降低，丁腈橡胶耐候性差，不适用于户外，主要用于潜油泵电缆护套和电机、电器引接线的护套。

氯磺化聚乙烯是由聚乙烯进行氯化和氯磺酰化反应制得的产品，使结晶聚乙烯转化为无定形弹性体。氯磺化聚乙烯含氯量的采用范围为 35%左右，含硫量约 1%。具有很优越的耐候、耐臭氧、耐油、耐溶剂、耐浓度较低的硫酸和浓度较低的苛性钠水溶液以及其他强氧化剂，具有耐磨和耐电晕性能，抗张强度较高，阻燃性好，基本电性尚可，是理想的电线电缆护套材料，也可作低压电线的绝缘。

氯化聚乙烯是高密度聚乙烯的氯化产物，含氯量为 30%～40%。使结晶聚乙烯转化为无定形弹性体。与氯磺化聚乙烯比较，其耐候、耐臭氧、耐电晕性基本相同，耐油、耐溶剂、耐化学品溶液、阻燃、弹性和抗张强度略逊，抗撕和耐热略优，但耐弯曲疲劳并不太好，基本电性尚可，可用于电线电缆护套，也可作低压电线的绝缘。

氯醚橡胶分子结构中无双键，耐候性、耐臭氧和耐热性优良，耐油性和耐溶剂性比丁腈橡胶更好，透气性小，为丁基橡胶的三分之一，还有良好的抗弯曲疲劳性，阻燃。但低温柔软性和加工性差。主要用于耐油、耐热电缆、油泵电缆、电机引接线等产品的护套。

硅橡胶主链含硅氧键、硫化后成弹性有机硅聚合物，电缆主要用甲基乙烯基硅橡胶，容易硫化，加工性能好，永久变形小。硅橡胶分子链柔软，分子间作用力小，但硅氧键能高，故耐寒和耐热性好，而耐油和耐溶剂性差，抗张强度虽低，但在高温时却超过其他橡胶。电性随温度和频率的变化甚微，耐电弧性好，可用于特种电线电缆的绝缘，如高温船用电缆、电机引接线、彩电高压包引线、热偶补偿线和电缆附件。

氟橡胶品种较多，电缆工业主要用偏二氟乙烯和全氟丙烯的共聚物，耐热、耐油、耐溶剂、耐化学药品，耐臭氧和耐候性都很好。缺点是在高温下机械性能明显降低，耐寒性差，在高温水蒸汽下不稳定。可用于石油化工方面的特种电缆护套，也可用于耐油性能高的电缆附件垫圈或镶嵌零件。

2 电气装备用电线电缆品种及技术指标

从电气装备用电线电缆技术发展历史来看，天然橡皮绝缘棉纱编织涂沥青电线（俗称皮线）和天然橡皮绝缘蜡线编织软线（俗称花线），是世界上最早的低压配电线、建筑用布电线、灯头线和家用电器用软线。国际上皮线早已淘汰，而我国在 20 世纪 90 年代仍有不少数量的供货，皮线最近期的标准是 JB 1601—1993《额定电压 300/500V 橡皮绝缘固定敷设电线》，2006 年又完成了修订稿，有待审查并发布。根据 2005 年电线电缆产品手册统计，生产皮线企业仍保持有 19 个之多。花线并未淘汰，因为与电热有关的家用电器，用聚氯乙烯连接线有烫坏的危险，选用花线甚有必要。花线最近期的标准是 JB 8735.3—1998《橡皮绝缘编织软电线》，但最近的 IEC 标准中，花线绝缘已不用天然-丁苯橡胶，改用乙丙橡胶。总的来说，用户对电气装备用电线电缆，通常要求跟踪国际先进技术指标。近期来自动化控制、交通运输领域、阻燃和耐火等方面需要应用的电线电缆产品，在我国已取得很大的技术进步。

2.1　通用聚氯乙烯绝缘电线电缆

聚氯乙烯绝缘电线电缆用途广泛，长期以来按 GB 5023—1985 生产，后来修订为 GB 5023—1997《额定电压 450/750V 及以下聚氯乙烯绝缘电缆》标准，该标准等同采用 IEC 227—1993 标准，内容不能完全适应国情，因此又制定了 JB 8734—1998《额定电压 450/750V 及以下聚氯乙烯绝缘电线和软线》标准，以作补充。虽然标准对产品型号的表示方法不同，但它们的结构和性能要求没有实质性的差别。

（1）室内供电用聚氯乙烯绝缘电缆及软线。一般室内供电用聚氯乙烯绝缘电缆及软线的型号、产品名称、规格和敷设条件见表 5.5-7 和表 5.5-8。这些产品也可用作设备内部连接线。

（2）聚氯乙烯绝缘耐油聚氯乙烯护套多芯屏蔽及非屏蔽软电缆。聚氯乙烯绝缘耐油聚氯乙烯护套多芯屏蔽及非屏蔽软电缆型号、产品名称及规格见表 5.5-9。

（3）聚氯乙烯绝缘屏蔽及非屏蔽安装线。聚氯乙烯绝缘屏蔽及非屏蔽安装线主要在工业领域应用，如控制电缆，但电压等级为 300/500V。如果用户要求为 600/1000V 等级的控制电缆，需注意不能取代。聚氯乙烯绝缘屏蔽及非屏蔽安装线型号、产品名称及规格见表 5.5-10。

表 5.5-7　聚氯乙烯绝缘电缆及软线（按 GB 5023）

型号（GB 5023）		产品名称	电压等级（V）	芯数	规格（mm^2）
1997 版	1985 版				
227 IEC 01	BV	一般用途单芯硬导体无护套电缆	450/750	1	1.5～400
227 IEC 02	RV	一般用途单芯软导体无护套电缆	450/750	1	1.5～240
227 IEC 05	BV	内部布线用导体温度为 70℃单芯实心导体无护套电缆	300/500	1	0.5～1
227 IEC 06	RV	内部布线用导体温度为 70℃单芯软导体无护套电缆	300/500	1	0.5～1
227 IEC 07	BV—90	内部布线用导体温度为 90℃单芯实心导体无护套电缆	300/500	1	0.5～2.5
227 IEC 08	RV—90	内部布线用导体温度为 90℃单芯软导体无护套电缆	300/500	1	0.5～2.5
227 IEC 10	BVV	轻型聚氯乙烯护套电缆	300/500	2～5	1.5～35
227 IEC 41	RTPVR	扁形铜皮软线	300/300	2	考核电阻
227 IEC 42	RVB	扁形无护套软线	300/300	2	0.5～0.75
227 IEC 43	SVR	户内装饰照明回路用软线	300/300	1	0.5～0.75
227 IEC 52	RVV	轻型聚氯乙烯护套软线	300/300	2，3	0.5～0.75
227 IEC 53	RVV	普通聚氯乙烯护套软线	300/500	2～5	0.75～2.5

注　1985 版中的型号是有重复的，需看名称及其电压等级。

表 5.5-8　聚氯乙烯绝缘电线和软线（按 JB 8734）

型号	产品名称	电压级（V）	芯数	标称截面（mm^2）	敷设要求
BV	铜芯聚氯乙烯绝缘电缆	300/500	1	0.75～1	固定布线
BLV	铝芯聚氯乙烯绝缘电缆	450/750	1	2.5～400	固定布线
BVR	铜芯聚氯乙烯绝缘软电缆	450/750	1	2.5～70	固定布线要求柔软场合
BVV	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套圆型电缆	300/500	1	0.75～10	固定布线
BLVV	铝芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套圆型电缆	300/500	1	2.5～10	固定布线
BVVB	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套扁型电缆	300/500	2，3	0.75～10	固定布线
BLVVB	铝芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套扁型电缆	300/500	2，3	2.5～10	固定布线
RVS	铜芯聚氯乙烯绝缘绞合型连接软线	300/500	2，3	0.5～0.75	可移动连接线

表 5.5-9　聚氯乙烯绝缘耐油聚氯乙烯护套多芯屏蔽及非屏蔽软电缆

型号		产品名称	芯数	电压等级（V）	规格（mm^2）
GB 5023—1985	GB 5023—1997				
RVVYP	227 IEC 74	耐油聚氯乙烯护套屏蔽软电缆	2～60	300/500	0.5～2.5
RVVY	227 IEC 75	耐油聚氯乙烯护套非屏蔽软电缆	2～60	300/500	0.5～2.5

表 5.5-10　聚氯乙烯绝缘屏蔽及非屏蔽安装线（按 JB 8734）

型号	产品名称	电压级（V）	芯数	标称截面（mm^2）	主要用途
AV	铜芯聚氯乙烯绝缘安装用电线	300/500	1	0.08～0.4	仪器和设备内部安装用电线
AVR	铜芯聚氯乙烯绝缘安装用软电线	300/500	1	0.08～0.4	
AVRB	铜芯聚氯乙烯绝缘扁型安装用软电线	300/500	2	0.12～0.4	
AVRS	铜芯聚氯乙烯绝缘绞型安装用软电线	300/500	2	0.12～0.4	
AVVR	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套安装用软电线	300/500	2～24	0.08～0.4	
AV—90	铜芯耐热 90℃聚氯乙烯绝缘安装用电线	300/500	1	0.08～0.4	
AVR—90	铜芯耐热聚氯乙烯绝缘安装用软电线	300/500	1	0.08～0.4	

续表

型号	产 品 名 称	电压级（V）	芯数	标称截面（mm²）	主要用途
AVP	铜芯聚氯乙烯绝缘安装用屏蔽电线	300/500	1	0.08～0.4	要求屏蔽的连接和安装用电线
RVP	铜芯聚氯乙烯绝缘屏蔽软电线	300/500	1～2	0.08～2.5	
RVVP	铜芯聚氯乙烯绝缘、编织屏蔽、聚氯乙烯护套软电缆	300/500	1～24	0.08～2.5	
RVVP1	铜芯聚氯乙烯绝缘、缠绕屏蔽、聚氯乙烯护套软电缆	300/500	1～24	0.08～2.5	
RVP—90	铜芯耐热90℃聚氯乙烯绝缘屏蔽软电线	300/500	1	0.08～2.5	
AVP—90	铜芯耐热90℃聚氯乙烯绝缘安装用屏蔽电线	300/500	1	0.08～0.4	

（4）典型聚氯乙烯绝缘电缆结构尺寸和绝缘电阻。BV、BVR和BVVB、BLVVB的结构尺寸和绝缘电阻分别见表5.5-11和表5.5-12。

（5）聚氯乙烯绝缘电线电缆性能要求。聚氯乙烯绝缘非电性要求见表5.5-13，聚氯乙烯护套非电性试验要求见表5.5-14，聚氯乙烯绝缘电性要求见表5.5-15。

（6）聚氯乙烯绝缘电线电缆其他性能要求。部分聚氯乙烯绝缘电线电缆需进行：

1）曲挠试验。

2）弯曲试验。

3）负重断芯试验。

4）绝缘线芯撕离试验。

具体品种和试验方法需参考GB 5023.2—1997及其单篇标准。

表5.5-11　　450/750 V级BV和BVR结构尺寸和绝缘电阻

导体标称截面（mm²）	导体种类		绝缘厚度（mm）		平均外径上限（mm）		绝缘电阻≥（MΩ·km）（70℃时）	
	BV	RV	BV	RV	BV	RV	BV	RV
1.5	1或2		0.7	0.7	3.3（3.4）	3.5	0.011（0.010）	0.010
2.5	1或2		0.8	0.8	3.9（4.2）	4.2	0.010（0.009）	0.009
4	1或2		0.8	0.8	4.4（4.8）	4.8	0.008 5（0.007 7）	0.007
6	1或2		0.8	0.8	4.9（5.4）	6.3	0.007 0（0.006 5）	0.006
10	1或2		1.0	1.0	6.4（6.8）	7.6	0.007 0（0.006 5）	0.005 6
16	2		1.0	1.0	8.0	8.8	0.005 0	0.004 6
25	2		1.2	1.2	9.8	11.0	0.005 0	0.004 4
35	2		1.2	1.2	11.0	12.5	0.004 0	0.003 8
50	2	5	1.4	1.4	13.0	14.5	0.004 5	0.003 7
70	2		1.4	1.4	15.0	17.0	0.003 5	0.003 2
95	2		1.6	1.6	17.0	19.0	0.003 5	0.003 2
120	2		1.6	1.6	19.0	21.0	0.003 2	0.002 9
150	2		1.8	1.8	21.0	23.5	0.003 2	0.002 9
180	2		2.0	2.0	23.5	26.0	0.003 2	0.002 9
240	2		2.2	2.2	26.5	29.5	0.003 2	0.002 8
300	2		2.4	—	29.5	—	0.003 0	—
400	2		2.6	—	33.5	—	0.002 8	—

注　括号中为2型导体的数据。

表5.5-12　　300/500V级BVVB和BLVVB结构尺寸和绝缘电阻

标称截面（mm²）	单线根数	绝缘厚度（mm）	护套厚度（mm）	2芯外形尺寸（mm）		3芯外形尺寸（mm）		绝缘电阻≥（MΩ·km）（70℃时）
				下限值	上限值	下限值	上限值	
0.75	1	0.6	0.9	3.8×5.9	4.6×7.1	3.8×7.9	4.6×9.6	0.012
1.0	1	0.6	0.9	3.9×6.1	4.8×7.4	3.9×8.4	4.8×10.1	0.011
1.5	1	0.7	0.9	4.4×7.0	5.3×8.5	4.4×9.6	5.3×11.7	0.011
2.5	1	0.8	1.0	5.1×8.4	6.2×10.1	5.1×11.6	6.2×14.0	0.010
4	1	0.8	1.0	5.6×9.2	6.7×11.1	5.8×13.1	7.0×15.8	0.008 5
4	7	0.8	1.0	5.7×9.5	6.9×11.5	5.9×13.5	7.1×16.3	0.008 0
6	1	0.8	1.1	6.2×10.4	7.5×125	6.2×14.5	7.5×17.5	0.007 0
6	7	0.8	1.1	6.4×10.8	7.8×13.0	6.4×15.1	7.8×18.2	0.006 5
10	7	1.0	1.2	7.9×13.4	9.5×16.2	7.9×19.0	9.5×23.0	0.006 5

表 5.5-13　　聚氯乙烯绝缘非电性试验要求

序号	试　验　项　目	单位	混　合　物　型　号		
			PVC/C	PVC/D	PVC/E
1	原始力学性能				
	抗张强度：最小中间值	N/mm^2	12.5	10.0	15.0
	断裂伸长率：最小中间值	%	125	150	150
2	空气烘箱老化后力学性能				
	老化条件：温度	℃	80±2	80±2	135±2
	时间	h	168	168	240
	抗张强度：最小中间值	N/mm^2	12.5	10.0	15.0
	最大变化率	%	±20	±20	±25
	断裂伸长率：最小中间值	%	125	150	150
	最大变化率	%	±20	±20	±25
3	失重试验				
	老化条件：温度	℃	80±2	80±2	115±2
	时间	h	168	168	240
	失重：最大值	mg/cm^2	2.0	2.0	2.0
4	不污染试验				
	老化条件：温度	℃	80±2	80±2	135±2
	时间	h	168	168	240
	抗张强度：最小中间值	N/mm^2	12.5	10.0	15.0
	最大变化率	%	±20	±20	±25
	断裂伸长率：最小中间值	%	125	150	150
	最大变化率	%	±20	±20	±25
5	热冲击试验				
	试验条件：温度	℃	150±2	150±2	150±2
	时间	h	1	1	1
	试验结果		不开裂	不开裂	不开裂
6	高温压力试验				
	试验条件：压力及时间		按 GB/T 2951	按 GB/T 2951	按 GB/T 2951
	温度	℃	80±2	70±2	90±2
	试验结果：压痕深度最大中间值	%	50	50	50
7	低温弯曲试验				
	试验条件：温度	℃	−15±2	−15±2	−15±2
	试验结果		不开裂	不开裂	不开裂
8	低温拉伸试验				
	试验条件：温度	℃	−15±2	−15±2	−15±2
	试验结果：最小伸长率	%	20	20	20
9	低温冲击试验				
	试验条件：温度	℃	−15±2	−15±2	−15±2
	试验结果		不开裂	不开裂	不开裂
10	热稳定性试验				
	试验条件：温度	℃	—	—	200±0.5
	试验结果：最小平均热稳定时间	min	—	—	180

注　所有试验项目均需要按 GB/T 2951.1～7—1997 标准的相应试验方法进行。

表 5.5-14　　聚氯乙烯护套非电性试验要求

序号	试　验　项　目	单位	混　合　物　型　号		
			PVC/ST3	PVC/ST5	PVC/ST9
1	原始力学性能				
	抗张强度：最小中间值	N/mm^2	12.5	10.0	15.0
	断裂伸长率：最小中间值	%	125	150	150
2	空气烘箱老化后力学性能				
	老化条件：温度	℃	80±2	80±2	80±2
	时间	h	168	168	168
	抗张强度：最小中间值	N/mm^2	12.5	10.0	10.0
	最大变化率	%	±20	±20	±20
	断裂伸长率：最小中间值	%	125	150	150
	最大变化率	%	±20	±20	±20

续表

序号	试验项目	单位	混合物型号		
			PVC/ST3	PVC/ST5	PVC/ST9
3	失重试验				
	老化条件：温度	℃	80±2	80±2	80±2
	时间	h	168	168	168
	失重：最大值	mg/cm²	2.0	2.0	2.0
4	不污染试验				
	老化条件：温度	℃	80±2	80±2	80±2
	时间	h	168	168	168
	抗张强度：最小中间值	N/mm²	12.5	10.0	10.0
	最大变化率	%	±20	±20	±20
	断裂伸长率：最小中间值	%	125	150	150
	最大变化率	%	±20	±20	±20
5	热冲击试验				
	试验条件：温度	℃	150±2	150±2	150±2
	时间	h	1	1	1
	试验结果		不开裂	不开裂	不开裂
6	高温压力试验				
	试验条件：压力及时间		按 GB/T 2951	按 GB/T 2951	按 GB/T 2951
	温度	℃	80±2	70±2	70±2
	试验结果：压痕深度最大中间值	%	50	50	50
7	低温弯曲试验				
	试验条件：温度	℃	−15±2	−15±2	−15±2
	试验结果		不开裂	不开裂	不开裂
8	低温拉伸试验				
	试验条件：温度	℃	−15±2	−15±2	−15±2
	试验结果：最小伸长率	%	20	20	20
9	低温冲击试验				
	试验条件：温度	℃	−15±2	−15±2	−15±2
	试验结果		不开裂	不开裂	不开裂
10	浸矿物油后性能				
	试验条件：矿物油温度	℃	—	—	90±2
	浸油时间	h	—	—	24
	试验结果：抗张强度最大变化率	%	—	—	±30
	断裂伸长率最大变化率	%	—	—	±30

注 所有试验项目均需要按 GB/T 2951.1～7—1997 标准的相应试验方法进行。

表 5.5-15 聚氯乙烯绝缘电性试验要求

序号	试验项目	单位	产品额定电压		
			300/300V	300/500V	450/750V
1	导体电阻测量	Ω/km	符合 GB 5023—1997 和 JB 8734—1998 产品指标		
2	成品耐电压试验				
	试验条件：试样最小长度	m	10	10	10
	浸水最少时间	h	1	1	1
	水温	℃	20±5	20±5	20±5
	试验电压：（交流）	V	2000	2000	2000
	施加电压时间	min	5	5	5
	试验结果		不击穿	不击穿	不击穿
3	绝缘线芯耐电压试验				
	试验条件：试样最小长度	m	5		5
	浸水最少时间	h	1		1
	水温	℃	20±5		20±5
	试验电压（交流）				
	绝缘厚度 0.6mm 及以下	V	1500		—
	绝缘厚度 0.6mm 以上	V	2000		2500
	施加电压时间	min	5		5
	试验结果		不击穿		不击穿
4	绝缘电阻测量				
	试验条件：试样最小长度	m	5	5	5
	经上述 2 或 3 试验后				
	浸水最少时间	h	2	2	2
	水温	℃	符合产品规定	符合产品规定	符合产品规定
	试验结果		符合产品指标	符合产品指标	符合产品指标

2.2　铜芯聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线电缆

20 世纪 70 年代后期，我国铜芯聚氯乙烯绝缘尼龙护套线有一定的发展，当时主要用于航空电线，年产量曾达到 9000km，后来航空方面逐步停止使用。到 20 世纪 90 年代后期，铜芯聚氯乙烯绝缘尼龙护套线作为新型室内布电线，简称尼龙线，按 JB/T 10261—2001《额定电压 450/750V 及以下聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线和电缆》标准生产，但至今总体用量并不很大。尼龙是一种优质的保护层，提高了电线的总体性能水平。其绝缘厚度比同规格的 BV 线薄，外径小、重量轻。小规格 BVN 和 BV 电线成本大致相等，大规格线则前者略高于后者。综合分析尼龙线有以下优点：①采用相同耐温等级聚氯乙烯绝缘电缆料，有尼龙护套的电线使用温度约可提高 10℃；或相同温度下使用，寿命可延长一倍，估计达 40 年。②尼龙 6 软化点为 190℃，熔点为 215℃，有尼龙层保护，电线短时过载安全性能高于聚氯乙烯电线。③我国建筑规范规定，无护套的电线应采用穿管布线，全部电线断面占其管子面积的 40%～50%。尼龙线直径小，可减小管径，降低了建筑投资。④尼龙表面光滑，摩擦力小，尼龙线重量略轻，容易穿管施工。⑤对于电线制造厂来说，电线的体积和重量减小，意味着包装和运输费用降低。⑥尼龙可用一般 1∶25 挤塑机挤出，只需换螺杆，不需专用设备。⑦护套线 BVNVB 与 BVVB 比较，经济性更显著。⑧尼龙耐油性能优越，也可使用在其他场合，如普通机床等，以前也曾大量用于飞机的布线。聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线电缆的型号、产品名称和用途见表 5.5-16。电缆的规格见表 5.5-17。电线和电缆结构及绝缘电阻见表 5.5-18～表 5.5-20。聚氯乙烯绝缘和护套的要求与本章 2.1 相同。聚氯乙烯绝缘尼龙护套的厚度基本参照 UL-83 的规定。

表 5.5-16　聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线电缆的型号、产品名称和用途

型　号	名　　称	主要用途
BVN	铜芯耐热 70℃聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线	建筑、电器、开关等固定用布线
BVN—90	铜芯耐热 90℃聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线	同上，但要求耐热场合
BVNVB	铜芯耐热 70℃聚氯乙烯尼龙护套绝缘、聚氯乙烯护套扁型电缆	建筑用固定布线

表 5.5-17　聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线电缆的规格

型号	额定电压（V）	芯数	标称截面（mm²）
BVN	300/500	1	0.5～1.0
BVN—90	300/500	1	0.5～1.0
BVN	450/750	1	1.5～400
BVN—90	450/750	1	1.5～400
BVNVB	300/500	2，3	0.75～10

表 5.5-18　300/500V BVN、BVN—90 型电线结构及绝缘电阻

导体标称截面（mm²）	导体种类	绝缘厚度规定值（mm）		尼龙护套厚度规定值（mm）	平均外径上限(mm)	绝缘电阻最小值（MΩ·km）（70℃或 90℃时）
		平均	最薄处	最薄处		
0.5	1	0.4	0.33	0.10	2.2	0.015
0.75	1	0.4	0.33	0.10	2.4	0.012
0.75	2	0.4	0.33	0.10	2.5	0.014
1	1	0.4	0.33	0.10	2.6	0.011
1	1	0.4	0.33	0.10	2.7	0.013

表 5.5-19　450/750V BVN、BVN—90 型电线结构及绝缘电阻

导体标称截面（mm²）	导体种类	绝缘厚度规定值（mm）		尼龙护套厚度规定值（mm）	平均外径上限（mm）	绝缘电阻最小值（MΩ·km）（70℃或 90℃时）
		平均	最薄处	最薄处		
1.5	1	0.4	0.33	0.1	2.9	0.011
1.5	2	0.4	0.33	0.1	3.0	0.010
2.5	1	0.4	0.33	0.1	3.3	0.010
2.5	2	0.4	0.33	0.1	3.4	0.009
4	1	0.4	0.33	0.1	3.8	0.008 5
4	2	0.4	0.33	0.1	4.0	0.007 7
6	1	0.5	0.42	0.1	4.7	0.007 0
6	2	0.5	0.42	0.1	4.9	0.006 5
10	1	0.7	0.6	0.13	6.2	0.007 0
10	2	0.7	0.6	0.13	6.5	0.006 5
16	2	0.8	0.69	0.13	7.8	0.005 0
25	2	1.0	0.87	0.15	9.9	0.005 0
35	2	1.0	0.87	0.15	11.0	0.004 0
50	2	1.2	1.05	0.18	13.0	0.004 5
70	2	1.3	1.14	0.18	15.5	0.003 5
95	2	1.3	1.14	0.18	17.0	0.003 5
120	2	1.4	1.23	0.18	19.0	0.003 2
150	2	1.5	1.32	0.2	21.0	0.003 2
185	2	1.6	1.41	0.2	23.5	0.003 2
240	2	1.6	1.41	0.2	26.0	0.003 2
300	2	1.8	1.59	0.23	29.0	0.003 0
400	2	1.8	1.59	0.23	32.5	0.002 8

表 5.5-20　300/500V BVNVB 型扁型电缆结构及绝缘电阻

芯数×标称截面（mm²）	异体种类	绝缘厚度规定值（mm）		护套厚度（mm）		平均外形尺寸（mm）		绝缘电阻最小值（MΩ·km）（70℃或 90℃时）
				尼龙	PVC			
		平均	最薄处	最薄处	平均	上　限	下　限	
2×0.75	1	0.4	0.33	0.1	0.9	3.7×5.7	4.5×6.8	0.012
2×1	1	0.4	0.33	0.1	0.9	3.9×6.0	4.7×7.3	0.011
2×1.5	1	0.4	0.33	0.1	0.9	4.1×6.4	4.9×7.8	0.011
2×2.5	1	0.4	0.33	0.1	1.0	4.7×7.4	5.6×8.9	0.010
2×4	1	0.4	0.33	0.1	1.0	5.1×8.3	6.2×10.0	0.008 5
2×4	2	0.4	0.33	0.1	1.0	5.2×8.5	6.3×10.3	0.007 7
2×6	1	0.5	0.42	0.1	1.1	6.0×9.8	7.2×11.8	0.007 0
2×6	2	0.5	0.42	0.1	1.1	6.1×10.2	7.4×12.3	0.006 5
2×10	1	0.7	0.6	0.13	1.2	7.4×12.5	8.9×15.1	0.007 0
2×10	2	0.7	0.6	0.13	1.2	7.7×13.0	9.3×15.6	0.006 5

续表

芯数×标称截面（mm²）	异体种类	绝缘厚度规定值（mm）		护套厚度（mm）		平均外形尺寸（mm）		绝缘电阻最小值（MΩ·km）（70℃或90℃时）
				尼龙	PVC			
		平均	最薄处	最薄处	平均	上 限	下 限	
3×0.75	1	0.35	0.28	0.1	0.9	3.6×7.3	4.4×8.9	0.012
3×1	1	0.35	0.28	0.1	0.9	3.7×7.8	4.5×9.4	0.011
3×1.5	1	0.4	0.33	0.1	0.9	4.1×8.8	4.9×10.6	0.011
3×2.5	1	0.4	0.33	0.1	1.0	4.7×10.1	5.6×12.2	0.010
3×4	1	0.4	0.33	0.1	1.1	5.3×11.6	6.4×14.0	0.008 5
3×4	2	0.4	0.33	0.1	1.1	5.4×12.0	6.6×14.6	0.007 7
3×6	1	0.6	0.42	0.1	1.1	6.0×13.6	7.2×16.5	0.007 0
3×6	2	0.6	0.42	0.1	1.1	6.1×14.2	7.4×17.2	0.006 5
3×10	1	0.7	0.6	0.13	1.2	7.4×17.5	8.9×21.2	0.007 0
3×10	2	0.7	0.6	0.13	1.2	7.7×18.4	9.3×22.2	0.006 5

2.3 通用橡皮绝缘电线电缆

多年来我国通用橡皮绝缘电线电缆按照GB 5013—1985标准生产。后来修订为GB 5013—1997《额定电压450/750V及以下橡皮绝缘电缆》标准，该标准等同采用IEC 245—1994标准。但国内一时不能完全适应，因此编制了JB 8375—1998《额定电压450/750V及以下橡皮绝缘软线和软电缆》标准用来补充。最近IEC 245—2003标准又增加了新型号，同时淘汰某些老型号，GB 5013仍在进一步修订中。20多年来，合成橡胶不断发展，天然橡胶在电缆中的使用量逐年下降，并趋向淘汰。综合以上情况，橡皮绝缘电缆型号和产品名称见表5.5-21和表5.5-22。硫化橡皮绝缘非电性试验和电性试验要求及硫化橡皮护套非电性试验要求分别见表5.5-23～表5.5-25。

2.3.1 耐热硅橡胶绝缘电缆（YG）

耐热硅橡胶绝缘电缆的额定电压为300/500V，导体最高温度为180℃，芯数为1芯，导体应符合GB/T 3956中第5种导体规定的要求。单线可以不镀锡或镀锡或镀银。不镀锡或镀银导体外可以绕包一层由合适材料制成的隔离层。绝缘应是单层挤包在导体上的IE2型硅橡胶混合物。绝缘线芯外应有一层经过规定处理的玻璃纤维编织层。YG型电缆的规格、绝缘厚度和外径尺寸应符合表5.5-26的规定。

表5.5-21 橡皮绝缘电缆型号和产品名称

型号（GB 5013）		产 品 名 称
1997版	1985版	
60245 IEC 03	YG	180℃耐热硅橡胶绝缘电缆
60245 IEC 04	YYY	110℃750V硬导体耐热乙烯—乙酸乙烯酯橡皮绝缘单芯无护套电缆
60245 IEC 05	YRYY	110℃750V软导体耐热乙烯—乙酸乙烯酯橡皮绝缘单芯无护套电缆
60245 IEC 06	YYY	110℃500V硬导体耐热乙烯—乙酸乙烯酯橡皮或相当的合成弹性体绝缘单芯无护套电缆
60245 IEC 07	YRYY	110℃500V软导体耐热乙烯—乙酸乙烯酯橡皮或相当的合成弹性体绝缘单芯无护套电缆
60245 IEC 53	YZ	普通强度橡套软线
60245 IEC 57	YZW	普通氯丁或相当的合成弹性体橡套软线
60245 IEC 58	YSF	装饰回路用氯丁或其他相当的合成弹性体橡套圆电缆
60245 IEC 58f	YSFB	装饰回路用氯丁或其他相当的合成弹性体橡套扁电缆
60245 IEC 66	YCW	重型氯丁或其他相当的合成弹性体橡套软电缆
60245 IEC 51	RX	编织软线（IEC 245-2003已取消）

注 1. 产品名称中的温度（℃）是该产品的导体最高工作温度；

2. 本表未罗列电焊机电缆和电梯电缆。

表5.5-22 橡皮绝缘电缆型号和产品名称补充

型 号		产 品 名 称
GB 5013	IEC 245—2003	
RQ	60245 IEC 86	橡皮绝缘和护套特软电线橡皮绝缘和护套特软电线
RQVJ	60245 IEC 87	橡皮绝缘和交联聚氯乙烯（XLPVC）护套特软电线
RQVJVJ	60245 IEC 88	交联聚氯乙烯（XLPVC）绝缘和护套特软电线
RQ	60245 IEC 89	乙丙橡皮绝缘编织特软电线

注 以上补充的产品及其型号目前尚未大量推广。

表 5.5-23　　硫化橡皮绝缘非电性试验要求

序　号	试　验　项　目	单　位	混　合　物　型　号		
			IE2	IE3	IE4
1	原始力学性能 抗张强度：最小中间值 断裂伸长率：最小中间值	 N/mm^2 %	 5.0 150	 6.5 200	 5.0 200
2	空气烘箱老化后力学性能（带铜线） 老化条件：温度 时间 抗张强度：最小中间值 最大变化率 断裂伸长率：最小中间值 最大变化率	 ℃ h N/mm^2 % % %	 200±2 240 4.0 — 120 —	 150±2 168 — ±30 — ±30	 100±2 168 4.2 ±25 200 ±25
3	空气弹老化后性能 老化条件：温度 时间 抗张强度：最小中间值 最大变化率 断裂伸长率：最小中间值 最大变化率	 ℃ h N/mm^2 % % %	 — 	 150±3 168 6.0 — — —30	 127±2 40 — — — ±30
4	热延伸试验 试验条件：温度 处理时间 机械应力 试验结果：载荷下伸长率最大值 冷却后伸长率，最大值	 ℃ min N/mm^2 % %	 200±3 15 0.2 175 25	 200±3 15 0.20 100 25	 200±3 15 0.20 100 25
5	耐臭氧试验 试验条件：温度 时间 臭氧浓度 试验结果	 ℃ h %	 —	 —	25±2 24 0.025～0.030 无裂纹
6	高温压力试验 试验条件：压力及时间 温度 试验结果：压痕深度最大中间值	 ℃ %	 —	按试验方法 150±2 50	—

表 5.5-24　　硫化橡皮绝缘电缆电性试验要求

序　号	试　验　项　目	单　位	产品额定电压		
			300/300V	300/500V	450/750V
1	导体电阻测量：最大值	Ω/m	符合 GB 5023—1997 和 JB 8734—1998 产品指标		
2	成品耐电压试验（试样长度） 试验条件：浸水最少时间 水温 试验电压（交流） 施加电压时间 试验结果	m h ℃ V min	10 1 20±5 2000 5 不击穿	10 1 20±5 2000 5 不击穿	10 1 20±5 2000 5 不击穿
3	绝缘线芯耐电压试验（试样长度） 试验条件：浸水最少时间 水温 试验电压：（交流） 绝缘厚度 0.6mm 及以下 绝缘厚度 0.6mm 以上 施加电压时间 试验结果	m h ℃ V V min	5 1 20±5 1500 2000 5 不击穿		5 1 20±5 — 2500 5 不击穿

表 5.5-25 硫化橡皮护套非电性试验要求

序号	试验项目	单位	混合物型号	
			SE3	SE4
1	原始抗张强度：最小中间值	N/mm^2	7.0	10.0
	原始断裂伸长率：最小中间值	%	300	300
2	空气烘箱老化后力学性能			
	老化条件：温度	℃	70±2	70±2
	时间	h	168	168
	抗张强度：最小中间值	N/mm^2	—	—
	最大变化率	%	±20	−15
	断裂伸长率：最小中间值	%	250	250
	最大变化率	%	±30	−25
3	浸矿物油后力学性能			
	老化条件：油温	℃		100±2
	处理时间	h		24
	抗张强度：最小中间值	N/mm^2	—	—
	最大变化率	%		±40
	断裂伸长率：最小中间值	%		—
	最大变化率	%		±40
4	热延伸试验			
	试验条件：温度	℃	200±3	200±3
	处理时间	min	15	15
	机械应力	N/mm^2	0.2	0.20
	试验结果：载荷下伸长率，最大值	%	175	100
	冷却后伸长率，最大值	%	25	25
5	低温弯曲试验			
	试验条件：温度	℃	—	−25±2
	处理时间	h		按 GB/T 2951.4
	试验结果	%		无裂纹
6	低温拉伸试验			
	试验条件：温度	℃	—	按 GB/T 2951.4
	处理时间	h		−35±2
	试验结果：未断裂时伸长率最小值	%		30

表 5.5-26 YG 型电缆的尺寸

导体标称截面（mm^2）	绝缘厚度规定值（mm）	电缆外径上限值（mm）
0.5	0.6	3.4
0.75	0.6	3.6
1	0.6	3.8
1.5	0.7	4.3
2.5	0.8	5.0
4	0.8	5.6
6	0.8	6.2
10	1.0	8.2
16	1.0	9.6

2.3.2 普通强度橡套软线（YZ）

普通强度橡套软线的额定电压为 300/500V，导体最高温度为 60℃，芯数为 2、3、4 和 5 芯，导体应符合 GB/T 3956 中第 5 种导体规定的要求。单线可以不镀锡或镀锡。导体外可以绕包一层由合适材料制成的隔离层。绝缘应是单层挤包在导体上的 IE4 型橡胶混合物。绝缘线芯和填充（若有）应绞合成缆。包覆在成缆线芯上的护套应是 SE3 型橡皮混合物，护套应单层挤出，并应填满成缆线芯的间隙，护套应能剥离而又不损伤绝缘线芯。YZ 型电缆的规格、绝缘厚度、护套厚度和电缆外径尺寸应符合表 5.5-27 的规定。

2.3.3 普通氯丁或其他相当的合成弹性体橡套软线（YZW）

普通氯丁或其他相当的合成弹性体橡套软线与普通强度橡套软线的额定电压和导体最高温度相同。内部结构和要求以及尺寸也相同。但护套应是 SE4 型橡皮混合物。

表 5.5-27 YZ 型和 YZW 型橡套软线的尺寸

芯数及导体标称截面（mm^2）	绝缘厚度规定值（mm）	护套厚度规定值（mm）	平均外径（mm）	
			下限值	上限值
2×0.75	0.6	0.8	5.7	7.4
2×1	0.6	0.9	6.1	8.0
2×1.5	0.8	1.0	7.6	9.8
2×2.5	0.9	1.1	9.0	11.6
3×0.75	0.6	0.9	6.2	8.1
3×1	0.6	0.9	6.5	8.5
3×1.5	0.8	1.0	8.0	10.4
3×2.5	0.9	1.1	9.6	12.4
4×0.75	0.6	0.9	6.8	8.8
4×1	0.6	0.9	7.1	9.3
4×1.5	0.8	1.1	9.0	11.6
4×2.5	0.9	1.2	10.7	13.8
5×0.75	0.6	1.0	7.6	9.9
5×1	0.6	1.0	8.0	10.3
5×1.5	0.8	1.1	9.8	12.7
5×2.5	0.9	1.3	11.9	15.3

2.3.4　重型氯丁或其他相当的合成弹性体橡套软电缆（YCW）

重型氯丁或其他相当的合成弹性体橡套软电缆（YCW）额定电压为 450/750V，导体最高温度为 60℃，芯数为 1、2、3 和 4 芯，导体应符合 GB/T 3956 中第 5 种导体规定的要求。单线可以不镀锡或镀锡。导体外可以绕包一层由合适材料制成的隔离层。绝缘应是单层挤包在导体上的 IE4 型橡胶混合物。导体标称截面超过 4mm² 的绝缘线芯，可螺旋绕包一层任选的刮胶带，其搭盖应至少 1mm。刮胶带应粘附绝缘，但应能剥离而又不损伤绝缘。绝缘线芯应绞合成缆，可以在成缆线芯中间放置填充。若是大截面导体的绝缘线芯，则可在挤护套前在成缆线芯上绕包织物带，使成品电缆绝缘线芯之间的外部间隙中没有任何实质性空隙。包覆在成缆线芯上的护套为：单芯电缆应是 SE4 型橡皮混合物；截面 10mm² 及以下多芯电缆单层挤出护套应是 SE4 型橡皮混合物；截面 10mm² 以上多芯电缆单层挤出护套也应是 SE4 型橡皮混合物；若是双层挤出护套，则其内层是 SE3 型橡皮混合物，外层是 SE4 型橡皮混合物。上述单层护套或双层护套的内层均应填满成缆线芯之间的间隙。所有护套应能剥离而又不损伤绝缘线芯。YCW 型电缆的规格、绝缘厚度、护套厚度和电缆外径尺寸应符合表 5.5-28～表 5.5-32 的规定。

表 5.5-28　YCW 型单芯橡套电缆的尺寸

芯数及导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）	护套厚度规定值(mm)			平均外径（mm）	
		单层	两层		下限值	上限值
			内层	外层		
1×1.5	0.8	1.4	—	—	5.7	7.1
1×2.5	0.9	1.4	—	—	6.3	7.9
1×4	1.0	1.5	—	—	7.2	9.0
1×6	1.0	1.6	—	—	7.9	9.8
1×10	1.2	1.8	—	—	9.5	11.9
1×16	1.2	1.9	—	—	10.8	13.4
1×25	1.4	2.0	—	—	12.7	15.8
1×35	1.4	2.2	—	—	14.3	17.9
1×50	1.6	2.4	—	—	16.5	20.6
1×70	1.6	2.6	—	—	18.6	23.3
1×95	1.8	2.8	—	—	20.8	26.0
1×120	1.8	3.0	—	—	22.8	28.6
1×150	2.0	3.2	—	—	25.2	31.4
1×185	2.2	3.4	—	—	27.6	34.4
1×240	2.4	3.5	—	—	30.6	38.3
1×300	2.6	3.6	—	—	33.5	41.9
1×400	2.8	3.8	—	—	37.4	46.8

表 5.5-29　YCW 型 2 芯橡套电缆的尺寸

芯数及导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）	护套厚度规定值(mm)			平均外径（mm）	
		单层	两层		下限值	上限值
			内层	外层		
2×1	0.8	1.3	—	—	7.7	10.0
2×1.5	0.8	1.5	—	—	8.5	11.0
2×2.5	0.9	1.7	—	—	10.2	13.1
2×4	1.0	1.8	—	—	11.8	15.1
2×6	1.0	2.0	—	—	13.1	16.8
2×10	1.2	3.1	—	—	17.7	22.6
2×16	1.2	3.3	1.3	2.0	20.2	25.7
2×25	1.4	3.6	1.4	2.2	24.3	30.7

表 5.5-30　YCW 型 3 芯橡套电缆的尺寸

芯数及导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）	护套厚度规定值(mm)			平均外径（mm）	
		单层	两层		下限值	上限值
			内层	外层		
3×1	0.8	1.4	—	—	8.3	10.7
3×1.5	0.8	1.6	—	—	9.2	11.9
3×2.5	0.9	1.8	—	—	10.9	14.0
3×4	1.0	1.9	—	—	12.7	16.2
3×6	1.0	2.1	—	—	14.1	18.0
3×10	1.2	3.3	—	—	19.1	24.2
3×16	1.2	3.5	1.4	2.1	21.8	27.6
3×25	1.4	3.8	1.5	2.3	26.1	33.0
3×35	1.4	4.1	1.6	2.5	29.3	37.1
3×50	1.6	4.5	1.8	2.7	34.1	42.9
3×70	1.6	4.8	1.9	2.9	38.4	48.3
3×95	1.8	5.3	2.1	3.2	43.3	54.0

表 5.5-31　YCW 型 4 芯橡套电缆的尺寸

芯数及导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）	护套厚度规定值(mm)			平均外径（mm）	
		单层	两层		下限值	上限值
			内层	外层		
4×1	0.8	1.5	—	—	9.2	11.9
4×1.5	0.8	1.7	—	—	10.2	13.1
4×2.5	0.9	1.9	—	—	12.1	15.5
4×4	1.0	2.0	—	—	14.0	17.9
4×6	1.0	2.3	—	—	15.7	20.0
4×10	1.2	3.4	—	—	20.9	16.5
4×16	1.2	3.6	1.4	2.2	23.8	30.1
4×25	1.4	4.1	1.6	2.5	28.9	36.6
4×35	1.4	4.4	1.7	2.7	32.5	41.1
4×50	1.6	4.8	1.9	2.9	37.7	47.5
4×70	1.6	5.2	2.0	3.2	42.7	54.0
4×95	1.8	5.9	2.3	3.6	48.4	61.0
4×120	1.8	6.0	2.4	3.6	53.0	66.0
4×150	2.0	6.5	2.6	3.9	58.0	73.0

表 5.5-32　YCW 型 5 芯橡套电缆的尺寸

芯数及导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）	护套厚度规定值(mm)			平均外径（mm）	
		单层	两层		下限值	上限值
			内层	外层		
5×1	0.8	1.6	—		10.2	13.1
5×1.5	0.8	1.8	—		11.2	14.4
5×2.5	0.9	2.0	—		13.3	17.0
5×4	1.0	2.2	—		15.6	19.9
5×6	1.0	2.5	—		17.5	22.2
5×10	1.2	3.6	—		22.9	29.1
5×16	1.2	3.9	1.5	2.4	26.4	33.3
5×25	1.4	4.4	1.7	2.7	32.0	40.4

2.3.5　装饰性回路用氯丁橡胶或其他相当的合成弹性体橡套电缆（YSF，YSFB）

装饰性回路用氯丁橡胶或其他相当的合成弹性体橡套电缆适用于室内和室外的装饰回路。额定电压为 300/500V，导体最高温度为 60℃，芯数为 1 芯或 2 芯，导体应符合 GB/T 3956 中第 5 种导体规定的要求。单线可不镀锡或镀锡。导体外可以绕包一层由合适材料制成的隔离层。绝缘应是单层挤包在导体上的 IE4 型橡胶混合物。2 芯电缆绝缘的 2 根绝缘线芯应平行放置，2 根导体中心之间的距离应符合

表5.5-33的规定。包覆在成缆线芯上的护套应是SE4型橡皮混合物，护套应单层挤出，并应填满成缆线芯的间隙，对于2芯扁电缆，护套应填满线芯之间的空隙形成填充。护套应能剥离而又不损伤绝缘线芯。护套优先选用的颜色是绿色和黑色。YSF和YSFB型电缆的规格、绝缘厚度、护套厚度和电缆外形尺寸应符合表5.5-33的规定。

表5.5-33 YSF和YSFB型电缆的尺寸

芯数及导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）	导体中心间距（mm）		护套厚度规定值（mm）	平均外形尺寸（mm）	
		平均下限	平均上限		下限	上限
1×0.75	0.8	—	—	0.8	4.1	5.2
1×1.5	0.8	—	—	0.8	4.5	5.6
2×1.5	0.8	6.7	7.0	0.8	5.0×13.0	6.0×14.0

2.3.6 乙烯—乙酸乙烯酯橡皮绝缘电缆

耐热乙烯—乙酸乙烯酯橡皮或其他相当的合成弹性体绝缘导体最高温度为110℃，规格为单芯、无护套，电压等级为300/500V和450/750V。实心导体为GB/T 3956中的第1种，软导体为其第5种。单线可以不镀锡或镀锡。如果导体不镀锡，应在导体周围外加一层由合适材料制成的隔离层；如果导体镀锡，则是否使用隔离层可任选。绝缘应是IE3型橡皮混合物。二种电压等级电路的绝缘厚度、绝缘电阻和成品平均外径应符合表5.5-34和表5.5-35的规定，电缆应有型号或导体最高温度标志。这类电缆预定用于工作在高温区的电气设备内部接线。

表5.5-34 300/500V（YYY和YRYY）型电缆综合数据

导体标称截面（mm²）	GB/T 3956中的导体种类	绝缘厚度规定值（mm）	平均外径（mm）		空气中的最小绝缘电阻①（MΩ·km）（110℃时）
			下限	上限	
0.5	1	0.6	1.9	2.4	0.015
0.75	1	0.6	2.1	2.6	0.013
1	1	0.6	2.2	2.8	0.012
0.5	5	0.6	2.1	2.6	0.014
0.75	5	0.6	2.2	2.8	0.012
1	5	0.6	2.4	2.9	0.011

① 这些数据是以在110℃空气中的绝缘电阻率为$10^{10}\Omega\cdot cm$为根据的。

表5.5-35 450/750V(YYY和YRYY)型电缆综合数据

导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）			平均外径(mm)						最小绝缘电阻①（MΩ·km）（110℃时）
	导体种类			下限			上限			
				导体种类			导体种类			
	1型	2型	5型	1型	2型	5型	1型	2型	5型	
0.5	0.8	—	0.8	2.3	—	2.4	2.9	—	3.1	0.018
0.75	0.8	—	0.8	2.4	—	2.6	3.1	—	3.2	0.016
1	0.8	—	0.8	2.6	—	2.7	3.2	—	3.4	0.014
1.5	0.8	0.8	0.8	2.8	2.9	3.0	3.5	3.7	3.7	0.012
2.5	0.9	0.9	0.9	3.4	3.5	3.6	4.3	4.4	4.5	0.011
4	1.0	1.0	1.0	4.0	4.2	4.3	5.0	5.2	5.4	0.010
6	1.0	1.0	1.0	4.5	4.7	4.8	5.6	5.9	6.0	0.009
10	1.2	1.2	1.2	5.7	6.0	6.0	7.1	7.4	7.6	0.008
16	—	1.2	1.2	—	6.8	7.1	—	8.5	8.9	0.006
25	—	1.4	1.4	—	8.4	8.8	—	10.6	11.0	0.005
35	—	1.4	1.4	—	9.4	10.1	—	11.8	12.6	0.005
50	—	1.6	1.6	—	10.9	11.9	—	13.7	14.9	0.004
70	—	1.6	1.6	—	12.5	13.6	—	15.6	17.0	0.004
95	—	1.8	1.8	—	14.5	15.5	—	18.1	19.3	0.004

① 在空气中测量，这些数据是以110℃空气中的绝缘电阻率为$10^{10}\Omega\cdot cm$为根据。

2.3.7 橡皮或交联聚氯乙烯绝缘和橡皮或交联聚氯乙烯护套特软电线（RQ和RQVJVJ）

橡皮或交联聚氯乙烯绝缘和橡皮或交联聚氯乙烯护套特软电线使用于要求特别柔软的场合（如电熨斗）。额定电压为300/300V，型号为60245 IEC 86（RQ），导体最高温度为60℃。芯数为2芯或3芯，导体应符合GB/T 3956第6种导体规定的要求，单线可以不镀锡或镀锡。每根导体外面可包覆一层由合适材料制成的隔离层。导体的挤包绝缘应是IE4型橡皮混合物。导体绞方和绝缘线芯的绞向应同向。挤包在成缆线芯上的护套应是SE3型橡皮混合物。绝缘厚度、成缆绞合最大节距、护套厚度应符合表5.5-36规定。护套应一次挤出，并应填满成缆绝缘线芯的间隙，护套应能剥离而又不损伤绝缘线芯。平均外径应在表5.5-36规定的范围内。作为后备材料，这种特软电线也可用交联聚氯乙烯（XLPVC）绝缘和护套，型号为60245 IEC 88（RQVJVJ），而导体最高温度为70℃。交联聚氯乙烯的多项性能与聚氯乙烯相似，空气老化温度和失重试验温度为100℃；高温压力试验温度为90℃±2℃；热延伸试验温度为200℃±3℃。

表5.5-36 RQ和RQVJVJ型特软电线尺寸

芯数及导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）	绝缘线芯最大绞合节距（mm）	护套厚度规定值（mm）	平均外径①（mm）	
				下限	上限
2×0.75	0.6	35	0.8	5.7	7.4
2×1	0.6	35	0.8	5.9	7.8
2×1.5	0.7	40	0.8	6.8	8.9
3×0.75	0.6	35	0.8	6.0	7.9
3×1	0.6	40	0.8	6.3	8.3
3×1.5	0.7	45	0.9	7.2	9.4

① 电缆的外形尺寸按IEC 60719进行计算。

2.3.8 乙丙橡皮绝缘编织特软电线

乙丙橡皮绝缘编织特软电线型号为60245 IEC 89（与花线相似，暂称RQB），额定电压300/300V，导体最高温度为60℃。导体芯数为2芯或3芯，导体结构应符合GB/T 3956中第6种导体规定的要求，但导体在20℃时的最大电阻值应增加3%。单线可以不镀锡或镀锡。每根导体外面可包覆一层由合适材料制成的隔离层。挤包在每根导体上的绝缘应是IE4型乙丙橡皮混合物，绝缘厚度应符合表5.5-37规定值。填充应是织物材料，绝缘线芯和填充绞合成缆的最大节距应不超过成缆线芯直径的7.5倍，导体和绝缘线芯的绞合方向应同向。成缆线芯外应包覆织物编织。其最少绳数为60；每米最少交叉数为700；最少锭子数为24。平均外径应在表5.5-37的规定范围内。该产品除常规试验外，应进行3轮曲挠试验，往复次数应为2000次，试验电流按表5.5-38的规定。另取试样进行组结试验，要求总共1500次往复。

表5.5-37 暂称RQB型特软电线尺寸

芯数及导体标称截面（mm²）	绝缘厚度规定值（mm）	平均外径（mm）	
		下限	上限
2×0.75	0.8	5.5	7.2
2×1	0.8	5.7	7.6
2×1.5	0.8	6.2	8.2
3×0.75	0.8	5.9	7.7
3×1	0.8	6.2	8.1
3×1.5	0.8	6.7	8.8

表 5.5-38　　3 轮曲挠试验参数

导体标称截面（mm^2）	试验电流（A）	重锤施加在绝缘线芯上的张力	
		2 芯（N）	3 芯（N）
0.75	6	15	20
1.0	10	20	25
1.5	16	25	30

2.4　电焊机电缆

根据 GB 5013.6—1997 标准，橡套电焊机电缆含有 2 个品种，型号为 60245 IEC 81（即 YHF）和 60245 IEC 82（即 YH）。YHF 是指氯丁橡套或包括其他当的合成弹性体橡套；YH 曾是指定天然—丁苯橡套，现在不作限定。电焊机电缆的额定电压不作规定。

电焊机电缆的导体芯数一般均为单芯。导体结构应符合表 5.5-39 的要求。单线可以不镀锡或镀锡。导体外应绕包一层合适材料的隔离层。护套（兼绝缘）应由下列中的一种组成：挤包单层抗张强度最小为 12MPa 的 SE3 型橡胶；挤包单层 SE4 型氯丁橡皮或其他相当的合成弹性体。另一种复合结构是由一层任选的织物带和挤包一层 SE4 型氯丁橡皮或其他相当的合成弹性体。单层护套厚度和复合覆盖层的总厚度及其中的护套厚应分别符合表 5.5-39 的规定值。如果绝缘不是挤包，则至少由两层组成。所有电缆平均外径应符合表 5.5-39 的范围。电焊机电缆的试验见表 5.5-40。

表 5.5-39　　YH 型和 YHF 型电缆综合数据

导体标称截面（mm^2）	导体中单线最大直径（mm）	覆盖层总厚度规定值（mm）	复合覆盖层中的护套厚度规定值（mm）	平均外径		导体最大电阻（20℃时）	
				下限（mm）	上限（mm）	单线镀锡（Ω/km）	单线未镀锡（Ω/km）
16	0.21	2.0	1.3	8.8	11.0	1.19	1.16
25	0.21	2.0	1.3	10.1	12.7	0.780	0.758
35	0.21	2.0	1.3	11.4	14.2	0.552	0.536
50	0.21	2.2	1.5	13.2	16.5	0.390	0.379
70	0.21	2.4	1.6	15.3	19.2	0.276	0.268
95	0.21	2.6	1.7	17.1	21.4	0.204	0.198

表 5.5-40　　YH 型和 YHF 型电缆的试验

序号	试 验 项 目	试验种类	试验方法 GB(GB/T)
1	电气性能试验		
	导体电阻	T，S	5013.2
	成品电缆 1000V 电压试验	T，S	5013.2
2	结构尺寸检查		
	结构检查	T，S	
	覆盖层厚度测量	T，S	2951.1
	外径测量（平均值）	T，S	
	椭圆度	T，S	
3	绝缘力学性能①		
	老化前拉力试验	T	2951.1
	空气烘箱老化后拉力试验	T	5013.2
	空气弹老化后拉力试验	T	2951.2
	热延伸试验	T	2951.5
	耐臭氧试验	T	2951.5
4	覆盖层或复合覆盖层中的护套机械性能		
	老化前拉力试验	T	2951.1
	空气烘箱老化后拉力试验	T	2951.2
	浸油后拉力试验②	T	2951.5
	撕裂试验	T	正在考虑中
	热延伸试验	T	2951.5
5	成品电缆机械强度		
	静态曲挠试验	T	5013.2

① 只适用于复合覆盖层中有 IE4 型橡皮混合物作为单独绝缘层的电缆。

② 只适用于 60245 IEC 82（YHF）型电缆。

2.5　电梯电缆

2.5.1　扁型聚氯乙烯护套电梯电缆和挠性连接用电缆

扁型聚氯乙烯护套电梯电缆和挠性连接用电缆按 GB 5023.6—1997 制造见图 5.5-1。该类电缆可在不低于 0℃的条件下使用。电缆型号和名称见表 5.5-41，截面及芯数见表 5.5-42。导体采用 GB/T 3956 中的第 5 种结构，两侧绝缘芯的导体可由铜线和钢线绞成，但其总截面应与其他导体截面相等，其电阻应不超过相同标称截面铜导体的 2 倍。扁型电梯电缆线芯应平行排列，但也允许按表 5.5-43 分组后平行排列，此时各组之间应有间距。线芯的绝缘厚度、各组的间距和护套厚度见表 5.5-44。绝缘和护套的性能要求与 5.2.1 节的 PVC/D 型和 PVC/ST5 型相同。成品电缆需要进行护套高温压力试验、低温冲击试验、静态曲挠试验、不延燃试验和 4 mm^2 及以下、芯数不超过 5 芯的电缆曲挠试验（试验方法详见 GB 5023.6—1997 标准）。

表 5.5-41　　电梯电缆型号及产品名称（按 GB 5023）

型　号		产品名称	电压级（V）	规　格（mm^2）
GB 5023—1985	GB 5023—1997			
TVVB	227 IEC 71f	扁型聚氯乙烯护套电梯电缆和挠性连接用电缆	450～750	0.75～25

表 5.5-42　　电梯电缆截面及芯数

导体标称截面（mm^2）	芯　数	备　注
0.75 和 1 1.5 和 2.5 4、6、10、16 和 25	(3)、(4)、(5)、6、9、12、(16)、(18)、(20) 或 24 (3)、4、5、6、9 或 12、4 或 5	括号内芯数为非优先数

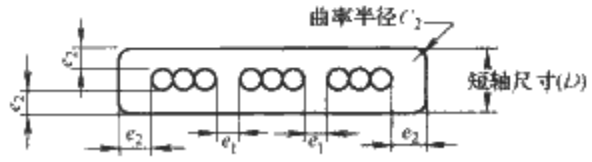


图 5.5-1　扁型聚氯乙烯护套电梯电缆示意图

表 5.5-43 电梯电缆不同芯数的分组

绝缘线芯数	5	6	9	12	16	18	20	24
分组	2+1+2	2×3	3×3	3×4	4×4	4+5+5+4	5×4	6×4

表 5.5-44 电梯电缆的结构尺寸和绝缘电阻

导体标称截面 (mm^2)	绝缘厚度规定值 (mm)	间距标称值 e_1 (mm)	护套厚度规定值(mm)		绝缘电阻最小值 (MΩ·km) (70℃时)
			e_2	e_3	
0.75	0.6	1.0	0.9	1.5	0.011
1	0.6	1.0	0.9	1.5	0.010
1.5	0.7	1.0	1.0	1.5	0.010
2.5	0.8	1.5	1.0	1.8	0.009
4	0.8	1.5	1.2	1.8	0.007
6	0.8	1.5	1.2	1.8	0.006
10	1.0	1.5	1.4	1.8	0.005 6
16	1.0	1.5	1.5	2.0	0.004 6
25	1.2	1.5	1.6	2.0	0.004 4

2.5.2 橡皮绝缘橡皮护套电梯电缆

橡皮绝缘电梯电缆是按 GB 5013.5—1997《额定电压 450/750V 及以下橡皮绝缘电缆》的第 5 部分电梯电缆编写，属于一般用途的编织、高强度橡皮、氯丁橡皮或其他相当的合成弹性体橡套电梯电缆。导体最高温度为 60℃。其型号和产品名称见表 5.5-45。本节内容不包括高速电梯电缆或高层建筑用电梯电缆，但不排除含有其他功能芯数或更多芯数的电缆结构。电缆的结构尺寸见表 5.5-46。橡皮绝缘电梯电缆的试验参考表 5.5-47 规定。橡皮绝缘电梯电缆的结构特点为：导体应为 GB/T 3956 中第 5 种，但在 20℃时的最大电阻值应增加 3%，单线可以不镀锡或镀锡；芯数为 1、6、9、12、18、24 或 30 芯；允许在每根导体外面包覆一层合适材料的隔离层；挤包在每根导体上的绝缘应是 IE4 型橡皮混合物；允许在每根绝缘线芯外面任选包覆一层织物编织层或相当的保护覆盖层；如果电梯电缆的中心垫芯包含承受拉力的元件，它应具有足够的抗拉强度；绝缘线芯、中心垫芯和填充物（若有）成缆时，绝缘线芯和任选的填充物应绞合在中心垫芯周围，填充物（若有）应由干棉纱或其他合适的纤维材料组成；中心垫芯应由大麻、黄麻或类似材料组成，它可能有承力元件；如果中心垫芯是由金属材料构成，则应用非导电材料包覆，包覆层的目的是防止由于金属承力元件断丝而损伤绝缘线芯，制造厂应说明电缆是否有承力元件；对于 6、9 和 12 芯的电缆，线芯应成缆为一层，对于 12 芯以上的电缆，线芯应成缆为一层或两层；成缆的横截面应呈圆形；绝缘线芯识别应按GB 5013.1的规定。

编织电梯电缆外覆盖层（YTB）应在缆芯外任选包覆一层内织物编织层或包带，以及一层外织物编织层，内织物编织层（若有）应采用棉纱或类似材料，若用织物胶布带或类似的带子，绕包搭盖至少为 1mm，外编织层应由合适的织物材料组成。对于防潮和阻燃的编织电梯电缆，外层编织后应浸透防潮和阻燃料。制造厂应说明电梯电缆是否阻燃。一般情况电缆外径不作规定。

关于高强度橡皮、氯丁橡皮等护套电梯电缆（YT 和 YTF），缆芯外应绕包扎带或内编织层，扎带应是棉纱或类似材料的带子。若是内编织层，则应用织物材料或类似材料。YT 型应采用 SE3 型橡皮护套，YTF 应采用 SE4 型橡皮护套，并应是阻燃的。电缆外径不作规定。

表 5.5-45 橡皮绝缘电梯电缆型号和产品名称

型号		产品名称	额定电压 (V)
5013.5—1983	5013.5—1997		
YTB	60245 IEC 70	编织电梯电缆	300/500
YT	60245 IEC 74	高强度橡套电梯电缆	
YTF	60245 IEC 75	氯丁或其他相当的合成弹性体橡套电梯电缆	

表 5.5-46 YTB、YT 和 YTF 型电缆的结构尺寸

芯数与导体标称截面 (mm^2)	绝缘厚度规定值 (mm)	护套厚度规定值 (mm)
(6×0.75)	0.8	1.5
6×1	0.8	1.5
(9×0.75)	0.8	2.0
9×1	0.8	2.0
(12×0.75)	0.8	2.0
12×1	0.8	2.0
(18×0.75)	0.8	2.0
18×1	0.8	2.0
(24×0.75)	0.8	2.5
24×1	0.8	2.5
(30×0.75)	0.8	2.5
30×1	0.8	2.5

注 如果绝缘线芯外面包覆了一层织物编织层或相当的保护层，则 0.75mm^2 绝缘线芯的绝缘厚度可减薄到 0.6mm。

表 5.5-47 YTB、YT 和 YTF 型电缆试验

序号	试验项目	试验种类	试验方法 GB (GB/T)
1	电气性能试验		5013.2
	导体电阻	T，S	
	绝缘线芯按规定绝缘厚度的电压试验	T	
	0.6mm 及以下为 1500V	T	
	0.6mm 以上为 2000V	T，S	
	成品电缆 2000V 电压试验		
2	结构尺寸检查	T，S	5013.1 和 5013.2
	结构检查	T，S	
	绝缘厚度测量	T，S	
	护套厚度测量		
3	绝缘力学性能		
	老化前拉力试验	T	2951.1
	空气烘箱老化后拉力试验	T	5013.2
	空气弹老化后拉力试验	T	2951.2
	热延伸试验	T	2951.5
	耐臭氧试验	T	2951.5
4	护套力学性能		
	老化前拉力试验	T	2951.1
	空气烘箱老化后拉力试验	T	2951.2
	浸油后拉力试验（只适用于 YTF 型电缆）	T	2951.5
	热延伸试验	T	2951.5
5	成品电缆机械强度		
	具有承力元件的中心垫芯抗张强度	T	5013.2
	静态曲挠试验	T	5013.2
	阻燃性试验（只适用于 YTF 型和阻燃编织电缆）	T	5013.2
	耐磨损试验（只适用于 YTB 型电缆）	T	5013.2
	大长度悬环试验	T	正在考虑中

2.6　电机绕组引接软电缆和软线

当前按 JB/T 6213《电机绕组引接软电缆和软线》标准，产品按温度等级或用途分为 5 个系列。电缆（电线）敷设时的允许弯曲半径应不小于电缆（电线）外径的 4 倍。

（1）连续运行导体最高温度为 70℃的软电缆和软线。70℃软电缆和软线产品型号、名称、规格和尺寸见表 5.5-48 和表 5.5-49。

（2）连续运行导体最高温度为 90℃的软电缆和软线。90℃软电缆和软线产品型号、名称、规格和尺寸见表 5.5-50～表 5.5-53。

（3）连续运行导体最高温度为 125℃和 150℃的软电缆和软线。125℃和 150℃软线产品型号、名称、规格和尺寸见表 5.5-54 和表 5.5-55。

（4）连续运行导体最高温度为 180℃的软电缆和软线。180℃软电缆和软线产品型号、名称、规格和尺寸见表 5.5-56和表 5.5-57。

（5）耐氟利昂软线。耐氟利昂软线产品型号、名称、规格和尺寸见表 5.5-58 和表 5.5-59。

表 5.5-48　　70℃软电缆和软线产品型号、名称和规格

型号	产品名称	额定电压 U_0（V）	芯数	标称截面（mm²）
JV	聚氯乙烯绝缘电机绕组引接电缆（电线）	500	1	0.12～50
JF	丁腈聚氯乙烯复合物绝缘电机绕组引接电缆（电线）			

表 5.5-49　　JV、JF 型产品结构尺寸

标称截面（mm²）	绝缘标称厚（mm）	平均外径上限（mm）
0.12	0.6	2.1
0.2	0.6	2.3
0.3	0.6	2.4
0.4	0.6	2.5
0.5	0.6	2.6
0.75	0.6	2.8
1.0	0.6	3.0
1.5	0.6	3.3
2.5	0.7	3.9
4	0.8	4.7
6	1.0	6.2
10	1.2	7.8
16	1.2	9.0
25	1.4	11.5
35	1.4	12.7
50	1.6	14.7

表 5.5-50　　90℃软电缆和软线产品型号和名称

型　号	名　　称
JE	乙丙橡皮绝缘电机绕组引接电缆（电线）
JEH	乙丙橡皮绝缘氯磺化聚乙烯护套电机绕组引接电缆（电线）
JEM	乙丙橡皮绝缘氯醚护套电机绕组引接电缆（电线）
JH	氯磺化聚乙烯绝缘电机绕组引接电缆（电线）

表 5.5-51　　JE、JEH、JEM 和 JH 产品规格

型　号	额定电压 U_0（V）	芯　数	标称截面（mm²）
JE	500 1000 3000 6000 10 000	1	0.2～10 0.2～240 2.5～240 16～240 25～240
JEH	500 1000 3000 6000 10 000	1	0.2～120 0.5～120 2.5～120 16～240 25～240
JEM	500 1000 3000 6000 10 000	1	0.2～120 0.5～120 2.5～120 16～240 25～240
JH	500 1000 3000	1	0.2～10 0.2～240 2.5～240

表 5.5-52　　JE、JH 型产品结构尺寸

标称截面（mm²）	JE、JH									
	绝缘标称厚度（mm）					平均外径上限（mm）				
	0.5 kV	1 kV	3 kV	6 kV	10 kV	0.5 kV	1 kV	3 kV	6 kV	10 kV
0.2	0.8	1.4	—	—	—	3.0	4.2	—	—	—
0.3	0.8	1.4	—	—	—	3.1	4.3	—	—	—
0.4	0.8	1.4	—	—	—	3.2	4.4	—	—	—
0.5	0.8	1.4	—	—	—	3.3	4.5	—	—	—
0.75	0.8	1.4	—	—	—	3.5	4.7	—	—	—
1.0	0.8	1.4	—	—	—	3.7	4.9	—	—	—
1.5	0.8	1.4	—	—	—	4.0	5.2	—	—	—
2.5	0.9	1.4	2.8	—	—	4.6	5.6	8.6	—	—
4	1.0	1.4	2.8	—	—	5.4	6.3	9.1	—	—
6	1.0	1.5	2.8	—	—	6.5	7.5	10.1	—	—
10	1.2	1.5	2.8	—	—	7.9	8.5	11.1	—	—
16	—	1.5	2.8	5.0	—	—	9.6	12.4	17.2	—
25	—	1.6	2.8	5.0	7.6	—	11.4	13.8	18.6	24.1
35	—	1.6	2.8	5.0	7.6	—	12.8	15.2	20.0	25.5
50	—	1.7	2.8	5.0	7.6	—	14.8	17.1	22.1	27.3
70	—	1.8	2.8	5.0	7.6	—	17.2	19.2	24.2	29.4
95	—	2.0	3.0	5.0	7.6	—	19.7	22.0	26.3	31.5
120	—	2.2	3.0	5.0	7.6	—	21.9	23.5	27.8	33.3
150	—	2.3	3.0	5.0	7.6	—	24.1	25.5	29.8	35.3
185	—	2.4	3.0	5.0	7.6	—	26.3	27.5	32.1	37.3
240	—	2.4	3.0	5.0	7.6	—	29.3	30.5	35.1	40.3

表 5.5-53　　JEH、JEM 型产品结构尺寸

标称截面（mm²）	绝缘标称厚度（mm）					护套标称厚度（mm）					平均外径上限（mm）				
	0.5 kV	1 kV	3 kV	6 kV	10 kV	0.5 kV	1 kV	3 kV	6 kV	10 kV	0.5 kV	1 kV	3 kV	6 kV	10 kV
0.2	0.6	—	—	—	—	0.8	—	—	—	—	3.9	—	—	—	—
0.3	0.6	—	—	—	—	0.8	—	—	—	—	4.0	—	—	—	—
0.4	0.6	—	—	—	—	0.8	—	—	—	—	4.1	—	—	—	—
0.5	0.6	1.0	—	—	—	0.8	0.8	—	—	—	4.3	5.1	—	—	—
0.75	0.6	1.0	—	—	—	0.8	0.8	—	—	—	4.5	5.4	—	—	—
1.0	0.6	1.0	—	—	—	0.8	0.8	—	—	—	4.7	5.5	—	—	—
1.5	0.6	1.0	—	—	—	0.8	0.8	—	—	—	5.0	5.9	—	—	—
2.5	0.8	1.2	2.3	—	—	1.0	1.0	1.4	—	—	6.2	7.1	10.3	—	—
4	0.8	1.2	2.3	—	—	1.0	1.0	1.4	—	—	6.8	7.7	11.0	—	—
6	0.8	1.2	2.3	—	—	1.0	1.0	1.4	—	—	7.5	8.4	12.0	—	—
10	1.0	1.4	2.5	—	—	1.2	1.2	1.4	—	—	10.0	10.9	14.0	—	—
16	1.0	1.4	2.5	3.5	—	1.2	1.2	1.4	1.8	—	11.2	12.0	15.2	18.0	—
25	1.0	1.4	2.5	3.5	6.0	1.4	1.4	1.6	2.0	2.0	13.7	14.6	17.8	20.6	24.6
35	1.0	1.4	2.5	3.5	6.0	1.4	1.4	1.6	2.0	2.0	14.9	15.7	18.9	21.7	25.7
50	1.2	1.6	2.5	3.5	6.0	1.6	1.6	1.8	2.0	2.5	17.1	17.9	20.9	23.3	28.3
70	1.2	1.6	2.5	3.5	6.0	1.6	1.6	2.0	2.5	2.5	19.6	20.5	24.0	27.0	32.0
95	1.4	1.8	2.8	3.5	6.0	1.6	1.6	2.0	2.5	2.5	21.9	22.8	26.5	28.9	33.9
120	1.6	1.8	2.8	3.5	6.0	1.8	1.8	2.1	2.5	2.5	24.6	25.0	28.6	30.8	35.8
150	—	—	—	3.5	6.0	—	—	—	2.5	2.5	—	—	—	31.5	36.5
185	—	—	—	3.5	6.0	—	—	—	2.5	2.5	—	—	—	33.5	38.5
240	—	—	—	3.5	6.0	—	—	—	2.5	2.5	—	—	—	36.5	41.5

表 5.5-54 125℃和150℃软电缆和软线型产品型号、名称和规格

型 号	名 称	额定电压 U_0（V）	芯数	标称截面（mm²）
JYJ125	125℃交联聚烯烃绝缘电机绕组引接电缆（电线）	500 1000 3000	1	0.5～120 0.5～120 2.5～120
JYJ150	150℃交联聚烯烃绝缘电机绕组引接电缆（电线）	500	1	0.5～120

表 5.5-55 JYJ 型产品结构尺寸

标称截面（mm²）	绝缘标称厚度（mm）			平均外径上限（mm）		
	500V	1000V	3000V	500V	1000V	3000V
0.5	0.8	1.4	—	3.3	4.5	—
0.75	0.8	1.4	—	3.5	4.7	—
1.0	0.8	1.4	—	3.7	4.9	—
1.5	0.8	1.4	—	4.0	5.2	—
2.5	0.8	1.4	2.8	4.4	5.6	8.6
4	0.8	1.4	2.8	5.0	6.3	9.1
6	0.8	1.5	2.8	6.1	7.5	10.1
10	1.2	1.5	2.8	7.9	8.5	11.1
16	1.2	1.5	2.8	9.0	9.6	12.4
25	1.2	1.6	2.8	10.8	11.4	13.8
35	1.2	1.6	2.8	12.0	12.8	15.2
50	1.4	1.7	2.8	14.2	14.8	17.1
70	1.6	1.8	2.8	16.8	17.2	19.2
95	1.6	2.0	3.0	18.9	19.7	22.0
120	1.6	2.2	3.0	21.1	21.9	23.5

表 5.5-56 180℃软电缆和软线产品型号、名称和规格

型号	名 称	额定电压 U_0（kV）	芯数	标称截面（mm²）
JG	硅橡皮绝缘电机绕组引接电缆（电线）	0.5 1 3 6 10	1	0.5～10 0.5～240 2.5～240 16～240 25～240

表 5.5-57 JG 型产品结构尺寸

标称截面（mm²）	绝缘标称厚度（mm）					平均外径上限（mm）				
	500V	1kV	3kV	6kV	10kV	500V	1kV	3kV	6kV	10kV
0.5	0.8	1.4	—	—	—	3.3	4.5	—	—	—
0.75	0.8	1.4	—	—	—	3.5	4.7	—	—	—
1.0	0.8	1.4	—	—	—	3.7	4.9	—	—	—
1.5	0.8	1.4	—	—	—	4.0	5.2	—	—	—
2.5	0.9	1.4	2.8	—	—	4.6	5.6	8.5	—	—
4	1.0	1.4	2.8	—	—	5.4	6.3	9.1	—	—
6	1.0	1.5	2.8	—	—	6.5	7.5	10.3	—	—
10	1.2	1.5	2.8	—	—	7.9	8.5	11.3	—	—
16	—	1.5	2.8	5.0	—	—	9.6	12.4	17.2	—
25	—	1.6	2.8	5.0	7.6	—	11.4	13.8	18.6	24.1
35	—	1.6	2.8	5.0	7.6	—	12.8	15.2	20.0	25.5
50	—	1.7	2.8	5.0	7.6	—	14.8	17.1	22.1	27.3
70	—	1.8	2.8	5.0	7.6	—	17.2	19.2	24.2	29.4
95	—	2.0	3.0	5.0	7.6	—	19.7	22.0	26.3	31.5
120	—	2.2	3.0	5.0	7.6	—	21.9	23.5	27.8	33.3
150	—	2.3	3.0	5.0	7.6	—	24.1	25.5	29.8	35.3
185	—	2.4	3.0	5.0	7.6	—	26.3	27.5	32.1	37.3
240	—	2.4	3.0	5.0	7.6	—	28.3	30.6	35.1	40.3

表 5.5-58 耐氟利昂软线产品型号、名称和规格

型号	名 称	额定电压 U_0（V）	芯数	标称截面（mm²）
JZ JF46	聚酯薄膜（纤维）绝缘耐氟里昂电机绕组引接软线 聚全氟乙丙烯绝缘耐氟里昂电机绕组引接软线	500	1	0.5～2.5

表 5.5-59 JZ 和 JF46 型产品结构尺寸

标称截面（mm²）	绝缘标称厚度（mm）		平均外径上限（mm）	
	JZ	JF46	JZ	JF46
0.5	0.45	0.4	1.90	1.80
0.75	0.45	0.4	2.10	2.00
1	0.45	0.4	2.30	2.20
1.25	0.45	0.4	2.45	2.30
1.5	0.60	0.4	2.90	2.45
2.0	0.60	0.5	3.10	3.00
2.5	0.60	0.5	3.30	3.10

2.7 矿物绝缘电缆及火灾模拟试验

矿物绝缘（MI）电缆主要是指氧化镁绝缘电缆，可用作低压配电布线、控制电缆、加热电缆以及特殊用途电缆等，有耐火电缆之最的称号，我国20世纪80年代开始制造和应用。随着社会对防火要求的提高，现在MI电缆已经形成一个庞大的市场。在制造工艺上，我国曾研究过垂直灌粉法，但效果不好而放弃，后来引进珠柱法生产电缆，赢得大批市场，产品也取得了信誉。珠柱法的优点是可生产规格较大的和芯数较多的电缆（包括控制电缆），但缺点是生产长度较短，工序多，速度慢。国内在2003年引进了灌装和盘拉技术，最近又采用更先进的自动化灌装纵包生产线，可完整地连续化生产，制造长度长，如1.5mm² 电线的制造长度可达3000m。由于氧化镁掺有硅油，能有效防止吸收潮气，不影响绝缘电阻下降，也简化了施工要求。

（1）矿物绝缘电缆的型号、产品名称和规格。按GB 13033—1991《额定电压750V及以下矿物绝缘电缆及终端》标准的说明，该标准适用于一般布线。该标准最近修订版本的电缆型号、产品名称和规格参见表5.5-60。

（2）矿物绝缘的结构参数。电缆结构参数见表5.5-61～表5.5-67。

（3）矿物绝缘电缆有关试验。矿物绝缘电缆外护套的火花试验见表5.5-68，烟密度试验要求见表5.5-69，其他试验项目见表5.5-70。

表 5.5-60 矿物绝缘的型号、产品名称和规格

型 号	产 品 名 称	额定电压（V）	芯数	标称截面（mm²）
BTTQ	轻型铜芯铜护套矿物绝缘电缆	500	1，2，3，4和7	1～4
BTTVQ	轻型铜芯铜护套聚氯乙烯外护套矿物绝缘电缆	500		1～4
WD—BTTYQ	轻型铜芯铜护套低烟无卤聚烯烃外护套矿物绝缘电缆	500		1～4
BTTZ	重型铜芯铜护套矿物绝缘电缆	750	1，2，3，4，7，12和19	1～400
BTTVZ	重型铜芯铜护套聚氯乙烯外护套矿物绝缘电缆	750		1～400
WD—BTTYZ	重型铜芯铜护套低烟无卤聚烯烃外护套矿物绝缘电缆	750		1～400

注 若采用铜合金护套，T改为TH（目前基本不用）。

表 5.5-61 铜导体电阻

导体标称截面（mm²）	电阻最大值（Ω/km）（20℃时）	导体标称截面（mm²）	电阻最大值（Ω/km）（20℃时）
1	18.1	50	0.387
1.5	12.1	70	0.263
2.5	7.41	95	0.193
4	4.61	120	0.153
6	3.08	150	0.124
10	1.83	185	0.099 1
16	1.15	240	0.075 4
25	0.727	300	0.060 1
35	0.524	400	0.047 0

表 5.5-62 500V 电缆绝缘、铜护套厚度和外径

导体标称截面（mm²）	绝缘标称厚度（mm）		铜护套厚度（t）和外径（D）（mm）									
			1芯		2芯		3芯		4芯		7芯	
	1，2芯	3，4，7芯	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D
1	0.65	0.75	0.31	3.1	0.41	5.1	0.45	5.8	0.48	6.3	0.52	7.6
1.5	0.65	0.75	0.32	3.4	0.43	5.7	0.48	6.4	0.50	7.0	0.54	8.4
2.5	0.65	0.75	0.34	3.8	0.49	6.6	0.50	7.3	0.54	8.1	0.61	9.7
4	0.65	—	0.38	4.4	0.54	7.7	—	—	—	—	—	—

表 5.5-63 500V 电缆铜护套电阻

导体标称截面（mm²）	铜护套电阻最大值（Ω/km）（20℃时）				
	1芯	2芯	3芯	4芯	7芯
1	8.85	3.95	3.15	2.71	2.06
1.5	7.75	3.35	2.67	2.33	1.78
2.5	6.48	2.53	2.23	1.85	1.36
4	4.98	1.96	—	—	—

表 5.5-64 750V 电缆绝缘、铜护套厚度

导体标称截面（mm²）	绝缘标称厚度（mm）（1～19芯）	铜护套厚度（mm）						
		1芯	2芯	3芯	4芯	7芯	12芯	19芯
1	1.30	0.39	0.51	0.53	0.56	0.62	0.73	0.79
1.5	1.30	0.41	0.54	0.56	0.59	0.65	0.76	0.84
2.5	1.30	0.42	0.57	0.59	0.62	0.69	0.81	—
4	1.30	0.45	0.61	0.63	0.68	0.75	—	—
6	1.30	0.48	0.65	0.68	0.71	—	—	—
10	1.30	0.50	0.71	0.75	0.78	—	—	—
16	1.30	0.54	0.78	0.82	0.86	—	—	—
25	1.30	0.60	0.85	0.87	0.93	—	—	—
35	1.30	0.64	—	—	—	—	—	—
50	1.30	0.69	—	—	—	—	—	—
70	1.30	0.76	—	—	—	—	—	—
95	1.30	0.80	—	—	—	—	—	—
120	1.30	0.85	—	—	—	—	—	—
150	1.30	0.90	—	—	—	—	—	—
185	1.40	0.94	—	—	—	—	—	—
240	1.60	0.99	—	—	—	—	—	—
300	1.80	1.08	—	—	—	—	—	—
400	2.10	1.17	—	—	—	—	—	—

表 5.5-65 750V 电缆铜护套外径

导体标称截面（mm²）	铜护套外径（mm）						
	1芯	2芯	3芯	4芯	7芯	12芯	19芯
1	4.6	7.3	7.7	8.4	9.9	13.0	15.2
1.5	4.9	7.9	8.3	9.1	10.8	14.1	16.6
2.5	5.3	8.7	9.3	10.1	12.1	15.6	—
4	5.9	9.8	10.4	11.4	13.6	—	—
6	6.4	10.9	11.5	12.7	—	—	—
10	7.3	12.7	13.6	14.8	—	—	—
16	8.3	14.7	15.6	17.3	—	—	—
25	9.6	17.1	18.2	20.1	—	—	—
35	10.7	—	—	—	—	—	—
50	12.1	—	—	—	—	—	—
70	13.7	—	—	—	—	—	—
95	15.4	—	—	—	—	—	—
120	16.8	—	—	—	—	—	—
150	18.4	—	—	—	—	—	—
185	20.4	—	—	—	—	—	—
240	23.3	—	—	—	—	—	—
300	26.0	—	—	—	—	—	—
400	30.0	—	—	—	—	—	—

表 5.5-66 750V 电缆铜护套电阻

导体标称截面（mm²）	铜护套电阻最大值（Ω/km）（20℃时）						
	1芯	2芯	3芯	4芯	7芯	12芯	19芯
1	4.63	2.19	1.99	1.72	1.31	0.843	0.663
1.5	4.13	1.90	1.75	1.51	1.15	0.744	0.570
2.5	3.71	1.63	1.47	1.29	0.959	0.630	—
4	3.09	1.35	1.23	1.04	0.783	—	—
6	2.67	1.13	1.03	0.887	—	—	—
10	2.23	0.887	0.783	0.690	—	—	—
16	1.81	0.695	0.622	0.533	—	—	—
25	1.40	0.546	0.500	0.423	—	—	—
35	1.17	—	—	—	—	—	—
50	0.959	—	—	—	—	—	—
70	0.767	—	—	—	—	—	—
95	0.646	—	—	—	—	—	—
120	0.556	—	—	—	—	—	—
150	0.479	—	—	—	—	—	—
185	0.412	—	—	—	—	—	—
240	0.341	—	—	—	—	—	—
300	0.280	—	—	—	—	—	—
400	0.223	—	—	—	—	—	—

表 5.5-67 电缆外护套标称厚度

铜护套外径 D（mm）	外套标称厚度（mm）	铜护套外径 D（mm）	外套标称厚度（mm）
$D\leqslant 7$	0.65	$15<D\leqslant 20$	1.00
$7<D\leqslant 15$	0.75	$20<D$	1.25

表 5.5-68 火花试验电压

铜护套外径 D（mm）	试验电压（有效值）（kV）
$D\leqslant 7$	4
$7<D\leqslant 15$	5
$15<D\leqslant 20$	6
$20<D$	8

表 5.5-69 烟密度试验参考值

电缆外径 D（mm）	样品数		透光率（%）（暂定值）
	电缆	缆束数①	
$20<D\leqslant 40$	2	—	60
$10<D\leqslant 20$	3	—	60
$5<D\leqslant 10$	$N_1=45/D$ 根电缆	—	50
$2<D\leqslant 5$	—	$N_2=45/3D$ 束	50

① 一束缆由7根电缆并直放在一起，用直径约为0.5mm的金属线从中心部位开始每隔100mm绕两圈扎紧而成。

表 5.5-70 矿物绝缘电缆的试验项目表

序 号	试 验 项 目	单 位	技 术 要 求	试验类型
1	导体电阻	Ω/km	符合表 5.5-61 规定	R
2	绝缘：			
2.1	绝缘电阻（15±10℃时）≥	MΩ·km	1000（电缆<100m时实测值应≥10 000MΩ）	R
2.2	绝缘厚度		符合表 5.5-62 和表 5.5-64 规定	T
3	铜护套：			
3.1	护套电阻	Ω/km	符合表 5.5-63 和表 5.5-66 规定	T
3.2	铜护套厚度	mm	符合表 5.5-62 和表 5.5-64 规定	T
3.3	铜护套完整性		浸水后通过耐电压试验	R
3.4	外径和椭圆度	mm	符合表 5.5-62 和表 5.5-65 规定	R
4	外护套：			
4.1	材料特性		因可采用各种材料，故应按材料标准规定	S
4.2	厚度	mm	符合表 5.5-67 规定	S
4.3	火花试验	V	按表 5.5-68 规定和 GB/T 3048 方法进行试验	R
4.4	酸性腐蚀性气体		用无卤低烟外护套时应符合 GB/T 17650.2	S
5	电压试验（交流）：		导体间；每根导体和铜护套间	
5.1	电压试验（1min）500V级		2000 不击穿	S
	750V级	V	2500 不击穿	S
5.2	电压试验（15min）500V级		2000 不击穿	T
	750V级		2500 不击穿	T
6	力学性能试验：		分别经弯曲和压扁试验后，应无裂纹、裂缝、并通过15min浸水耐电压试验。试验电压：对500V电缆为750V；对750V电缆为1250V	
6.1	弯曲试验			T
6.2	压扁试验			T
7	阻燃性能试验：			
7.1	单根燃烧试验		符合 GB/T 18380.1（仅对由外护套电缆试验）	S
7.2	烟密度试验		符合表 5.5-和 GB/T 17651.2	T
7.3	耐火试验		符合 GB/T 19216.2	

（4）矿物绝缘电缆的全规格模拟火灾试验。目前执行的国家标准或 IEC 标准，都是规模较小的着火试验，实质上说只是一种定性的相对比较试验，并不能说明真正发生火灾时电缆究竟会出现什么情况。另有一项特殊的试验是全规格的模拟火灾试验，它可以真正考验电缆的耐火性能及其绝对毒性危害量的分析。这项试验由英国政府研究机构一火灾研究站制订的全规格火灾模拟试验，与实际火灾相当接近，是很严酷的燃烧试验方法，试验地点在英国卡玎顿。燃烧室的长、宽、高分别为 7.4m×5.7m×4m，燃烧室有一个吊顶，吊顶垂直深度为 1m，由不燃烧材料制造，应能承受 2h 的火灾而不塌下。用松木作燃料，松木先在窑内烘干，松木湿度为 20%。松木条总量为 150kg，共有 100 根木条搭成框架，松木条尺寸为 60mm×60mm×1m，每 10 根木条平行间隔放成一排，各排相互垂直，共 10 排，引火用汽油应在室温下存放直至启用。这样将产生 1-Megawatt 的能量，时间超过 30min。试验还有许多细节规定，此处从略。这项试验本身是模拟火灾条件，试验目标可由试验主持者自己制定。例如美国杜邦公司为多种结构和不同材料制成的局域网电缆进行对比试验，观察它们的延燃、发烟、二氧化碳等情况，他们的结论是 F-46 电缆情况最好。全规格火灾模拟试验的示意图见图 5.5-2。以往国内火灾发生后，电气线路很快失效，引起公安部的重视，开始着手进行耐火电缆规范化规定，最近也参考英国的规定进行了全规格火灾模拟试验，试验目的是观察各种阻燃电缆、耐火电缆究竟有多大的耐火能力。电缆有明线敷设、埋墙敷设和穿管敷设。经过试验后，结果是除氧化镁绝缘电缆外，其他电缆都经受不住这样的考验，许多国产云母带绝缘耐火电缆能保持运行的时间很短。IEC 标准称之为矿物绝缘电缆，此名称较为广义，实际上还是指氧化镁绝缘电缆，国内生产云母带绝缘耐火电缆的工厂为数甚多，而生产氧化镁绝缘电缆的工厂不很多。世界上进行这项试验的国家为数不多，前几年我国开展了这项工作，成绩显著。从全规格火灾模拟试验结果分析，目前云母带耐火电缆并不意味一定能保证建筑发生火灾时维持正常运行，而氧化镁绝缘电缆则能可靠地维持正常运行。全规格火灾模拟试验还可以考验各种电缆的二次危害性程度，电缆燃烧时一方面看它的单位重量物质燃烧散发出的 CO 和 CO_2 量的大小，另一方面看它的燃烧物质有多大，这项试验中某些电缆全部烧完，那么不管它是含卤或无卤，用 CO 和 CO_2 释放量来看，客观上毒性危害还是很大的。若某种电缆燃烧时有一些毒气发散，但它的自熄能力很强，没有较多的物质燃烧，则它的毒性危害就较小。

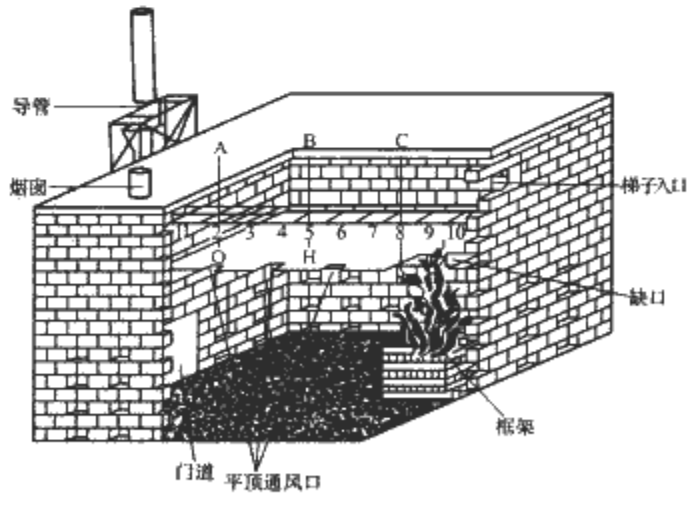


图 5.5-2 全规格火灾模拟试验立体剖面示意图

2.8 生活用恒功率加热电缆

生活用加热电缆大部分属于串连电路的恒功率加热电

缆，其发热元件为线性元件，如高电阻金属材料或铜和铜合金等，对被加热体的温度控制必须由温度传感元件来完成。

IEC 60800：1992《额定电压300/500V生活设施加热和防结冰用加热电缆》是有代表性的恒功率加热电产品制造标准，现在已适当修正后转化为GB/T标准。适用于低温下使用的加热电缆包括生活设施加热电缆和防止结冰电缆，电缆额定电压为300/500V，是属于串连线路方式的加热电缆。加热电缆的设计和结构应满足耐电、耐热和耐机械力的要求，以保证正常使用时的性能可靠并对用户或周围环境没有危害。该标准说明不包括工业用加热电缆，也不包括供电电压等于或小于50V的裸导体和带保护导体的电热产品。电缆在敷设期间及敷设后，其耐受机械力的能力分为3类：A类为低机械强度；B类为中机械强度；C类为高机械强度。生活设施加热和防结冰用加热电缆名称见表5.5-71。

另有几个参数应当提供用户：①额定温度，其意义是对任何一种有绝缘和护套的电缆指定的温度。该温度不会导致绝缘或护套在超过各自适用的表面温度下运行。②表面工作温度，其意义是电缆表面允许的最高连续温度。③单根（或多根）导体的额定电阻，其意义是1m长电缆在20℃时的电阻，并必须在电缆标志上明确。

（1）电缆结构的一般特点。

1）导体应由一根或多根纯金属或金属合金单线组成。假如导体由镀有金属镀层的纯铜线组成，则金属镀层应与导体工作温度相匹配。除非在产品标准中另有规定，导体在20℃±1℃时的电阻应是制造厂规定的数值，最大偏差为+10%和-5%。在多芯电缆中，所有加热导体均应有相同的标称电阻。导体电阻应不具有负温度系数。

2）认可绝缘和护套材料及其工作温度见表5.5-72，应用时需注意绝缘材料和所有护套材料的温度适配，可参考表5.5-73。

表5.5-71　生活设施加热和防结冰用加热电缆名称表

序　号（有型号含义）	产　品　名　称
1	单层有机物绝缘无金属套或屏蔽的加热电缆
2	有机物绝缘和护套无金属套或屏蔽的加热电缆
3	有机物绝缘和金属屏蔽的加热电缆
4	有机物绝缘、金属屏蔽和铠装的加热电缆
5	有机物绝缘和铠装的加热电缆
6	有机物绝缘和金属套的加热电缆
7	有机物绝缘、金属套和铠装的加热电缆
8	矿物绝缘电缆

表5.5-72　认可绝缘和护套材料

绝　缘　材　料	导体工作温度（℃）
PVC聚氯乙烯	70
EPR乙丙橡胶（硫化）	80
XLPE交联聚乙烯	80
EVAC乙烯/醋酸乙烯（交联）	100
MI—矿物绝缘	可协商
PVC聚氯乙烯	70
PA聚酰胺	80
CSP氯磺化聚乙烯（硫化）	80
HDPE高密度聚乙烯	80

注　实际上氟塑料已大量应用，但未列入IEC标准。

表5.5-73　防腐护套的适配

绝　缘	护　套	防腐护套
PVC	PVC	PVC
PVC	PA	PVC
EPR	PVC	PVC
XLPE	PVC	PVC
EPR	CSP	CSP
XLPE	HDPE	HDPE
XLPE	CSP	CSP
EVAC	CSP	CSP
EVAC	PA	CSP

3）屏蔽的功能是为了使用时的安全性，因此有防止耐穿透性要求。对于带屏蔽的电缆，其屏蔽结构应防止直径大于1 mm的外来物在不触及屏蔽的条件下穿透到绝缘上，在不触及屏蔽的条件下，试针应不能推入绝缘中。

4）铠装主要由钢丝组成，且不应直接施加在金属套（如有）上，而应用一适当绝缘材料组成的保护层将其隔开。该保护层能耐机械损伤及在正常使用条件下达到的温度，并应保护金属套不生锈或腐蚀。如果铠装作为唯一的金属护层，那么这样的铠装，如有必要可加入镀锡铜线，以保持足够的导电性能。钢丝铠装应有良好的保护以防生锈。

5）非金属外护套是能起到一定的机械和或防腐作用但并非所有电缆必需有的组成结构。

（2）成品电缆的特殊试验及使用场合。成品电缆的特殊试验是指一般电缆中不常进行的试验。

1）导体电阻测量：导体电阻应在长度至少为1m的试样上共测量2次。第1次在室温下测量，第2次在高于室温至少20K的温度下测量。将室温下的测量值换算成20℃±1℃时的值，然后判断该电阻值是否符合制造厂规定的数值。应将高温下测得的数值与室温下的进行比较，确认该导体电阻具有正温度系数。

2）高温下的电压试验：加热电缆的电气强度在达到工作温度时应满足正常使用条件下的要求，所以电缆应至少不低于规定工作温度下耐受试验电压。试样至少为5m，将电缆置于自然通风烘箱内，如果该电缆的导体额定温度小于150℃，则烘箱温度应为导体额定温度加上20℃±3℃。如果电缆的导体额定温度较高，则烘箱温度应高于导体额定温度20℃±5℃。矿物绝缘电缆应在制造厂规定的导体额定温度下试验，偏差为±3℃。电缆在该温度下放置2h，然后将1500V电压依次施加于每根导体和所有其他连接在一起的导体及金属套或任何其他金属护层之间，施加电压时间为15min。没有金属套或任何其他金属护层的电缆，应在5m长的试样上套上铜编织网套以保证试验（同于金属套电缆规定的试验）顺利进行。或者，这些电缆可以在一接地金属槽里试验，内有尺寸相同，直径不小于1mm也不大于3mm的导电圆球，例如滚珠，铅弹等。

3）高温下绝缘电阻试验：高于额定导体温度20K的温度下，绝缘电阻不小于0.03 MΩ·km。但矿物绝缘电缆例外。

4）成品电缆机械变形试验：加热电缆应能承受敷设期间和运行时可能产生的机械力。A类电缆为300N；B类电缆为600N；C类电缆为2000N。试验后，用正常视力或校正视力而不用放大镜检查时，护套应不开裂。成品电缆试样应在20℃±5℃温度下，垂直放在直径为6mm的圆柱形钢柱顶端，钢柱置于钢制平面上，用100mm² 刚性板对电缆试样施加压力，但不应对试样和钢柱交叉点的任一处产生冲

击。其中对A类电缆的压力为300N，B类电缆为600N，C类电缆为2000N。加压力30s后，仍处于压力之下的试样应能耐受1500V交流电压30s而不击穿。若是不带屏蔽和铠装的电缆，电压施加在导体和钢柱之间；有金属套、屏蔽和铠装的电缆，则施加在导体和金属套、屏蔽或铠装之间。

5）成品电缆机械拉力试验：所有成品电缆应进行拉力试验并应承受120N的最小拉力。夹头的起始间距应在100mm到200mm之间，夹头移动速率应为50mm/min，监测导体的连续性，并连续检查电缆试样任一组成部分是否有断裂的迹象。首次发现断裂现象时的负荷应是断裂负荷。共测试3个试样，并将最小断裂负荷作为试验结果。

6）正反卷绕试验：除矿物绝缘电缆外，所有电缆应进行正反卷绕试验。正反卷绕试验后的试样应通过规定的电压试验。成品电缆试样应在拉力负荷下，螺旋形紧密卷绕在芯棒上至少3圈。对于非屏蔽和屏蔽电缆，芯棒直径应为其外径的6倍；对于铠装电缆，芯棒直径应为其外径的15倍。整个试验包括6个试验周期，每个周期又包括将电缆卷绕在芯棒上，松开然后以相反方向重新卷绕，并且第1次卷绕时的螺旋形电缆内表面应为重新卷绕时的螺旋形电缆的外表面。试验后电缆任一部分不应损伤。护套的轻微皱褶不认为不合格。正反卷绕试验后，试样应进行1500V历时15min电压试验。

7）屏蔽穿透试验：当电缆平直放置和卷绕在直径为5倍于电缆直径的芯棒上时，用直径为1mm的钢制试针应能穿透屏蔽到绝缘上。当电缆平直放置或卷绕在直径为5倍于电缆直径的芯棒上时，试针在不触及屏蔽的情况下，应不能推入绝缘中。

8）加热电缆使用场合：A、B、C 3种加热电缆能够适用与于不同的场合，如机械压力、拉力、环境腐蚀和外界保护措施等，具体概况见表5.5-74。

表5.5-74　　加热电缆使用场合

分类	使用场合		机械保护措施
	建筑物	户外使用场合	
A	地面、天花板		所有电缆均敷设在水泥盖板下
B	地面、天花板、墙壁、屋顶和排水沟	路面和坡道	无机械保护措施
C			

2.9 工业用伴热电缆

工业管道及其阀门的加热常用定制的电热套。自发明伴热电缆后，在一定温度范围内，伴热电缆在施工方面具有较大的优势。伴热电缆外形为带状，所以又称伴热带，很方便直接缠绕在管道外，其外包保温材料。伴热电缆是并连式电路，可以任意分段使用。伴热电缆分恒功率型和自控温型二类，前者需用温度传感器来镇定温度，后者则自行控温。电缆的工作温度根据被加热对象而定，其绝缘和护套材料则应与发热元件温度配合，参考有关样本，最高维持温度为65、80、110和135℃等级别，电缆发热功率为0.8、15、25、31、47 W/m等。实际上不同型号的参数略有差异，各厂的参数也有差异，温度波动范围也比较大。

（1）氟塑料（常用F46）绝缘及护套恒功率伴热电缆其馈电线芯为具有一定间距的2根平行挤包绝缘实心铜线，再定距剥除绝缘，露铜点应当很窄，2根铜线的露铜点应当是等距离交叉，发热元件由缠绕在绝缘体外的高电阻合金线组成，当合金线与2根铜线的露铜点接触后，这一段合金线构成了一个发热元件，而整个伴热电缆长度上有许多连续而均匀的并联发热元件。此后是挤包F46绝缘，铜线编织和挤包F46外护套。这种伴热电缆的最高工作温度一般不超过150℃。

（2）导电塑料自控温加热电缆的发热元件由导电交联塑料制成，其形状与平行电视馈线相似，但材料是含碳黑的交联聚乙烯或交联氟塑料，2根馈电用的平行铜线接通电源后，中间导电塑料发热，由于导电塑料有较大的正电阻温度系数，温度升高会减小发热功率，反之则增加发热功率，故能自动调节功率而保持恒温。按不同材料来划分其工作温度等级，为导电塑料外挤包F46绝缘、铜线编织及挤包F46护套。自控温加热电缆不需要另设置控温元件，现在几乎完全取代恒功率伴热电缆。

（3）多晶体自控温电缆，其发热元件为圆形多晶体片（如$BaTiO_2$），将多晶体片等距离镶嵌在预先冲孔的氟塑料带上，多晶体片二侧敷上铜线编织带构成电级，其外层挤氟塑料绝缘和护套，二条编织带通电后，多晶体发热，同样利用其较大的正电阻温度系数，可达到自控温效应。多晶体的温度、寿命和电压特性均比半导电塑料好，其工作温度由绝缘材料而定，同样也可用于管道加热。多晶体材料纯度及稳定性要求很高，制造工艺不及导电塑料方便，没有广泛应用。

（4）高温伴热电缆实际上就是氧化镁绝缘电缆，其导体采用高电阻合金，外套为不锈钢。加热温度可达到450℃，适用与特种管道保温。

2.10 高层建筑用预制型分支电缆

高层建筑用预制型分支电缆是为配合城市高层建筑供电系统而开发的成套产品。高层建筑内的低压配电系统结构复杂，传统的聚氯乙烯绝缘电线配电线路方式中敷设和连接比较麻烦。20世纪70年代后期，国外开始发展预制型分支电缆，20世纪80年代初期开始大量投入应用。日本电线工业协会1980年制订了预制型分支电缆标准《JCS第376号—1980》，并于1992年修订为《JCS第376号A—1992》，但这2份标准的实质性内容并无多大差别。

预制型分支电缆是一种工场方式生产的组合产品，有如下优点：①预制型分支电缆的连接盒及其他附件都是预制件，各工序均处于受控状态，便于检验，所以质量稳定可靠。②由于产品是整体施工的，可省施工操作人员。③不需现场制作连接盒等工作，可缩短施工时间。④按照建筑设计图纸，可准确地按照设计定额备料，有效地节约材料。这些优点直接体现出采用预制型分支电缆的技术经济意义。

（1）预制型分支电缆的组成。预制型分支电缆一般由3部分组成：

1）电缆本体，国内目前主要选用GB 12706标准的聚氯乙烯或交联聚乙烯绝缘、聚氯乙烯护套电缆，可采用单芯和多芯电缆，也有用户提出云母带绝缘耐火电缆品种等。主干电缆和分支电缆的截面规格及其搭配、分支连接盒的位置分布、主干和分支电缆长度等参数，均需根据用户设计说明书确定。单芯预制型分支电缆，最后需要拧绞成一体。

2）分支连接盒的制造包括导体连接和绝缘两道工序，第一道工序是导体连接，主干电缆导体不允许割

断，分支电缆导体与主干电缆导体平行放置。选用开口的C形连接管，将C形管包在2根或多根导体外，用压机和模具将C形管压合，使连接管和各电缆的导体压接在一起，C形管见图 5.5-3。对于单芯电缆，国内也有些厂选用封闭的O形管连接。第二道工序是绝缘，虽然可以采用多种方法来完成绝缘件，实际上最常用的是聚氯乙烯注塑成型。

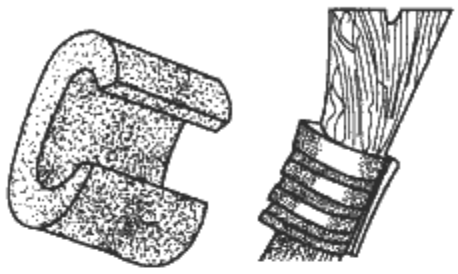


图 5.5-3　C形管实像

3）起吊夹具用来吊装电缆，电缆吊装后一般考虑在24h内将电缆固定在建筑结构上，此后起吊夹具就不再承受大的拉力。

（2）高层建筑用预制型分支电缆的典型配电系统。高层建筑用预制型分支电缆典型配电系统设计参见图 5.5-4。

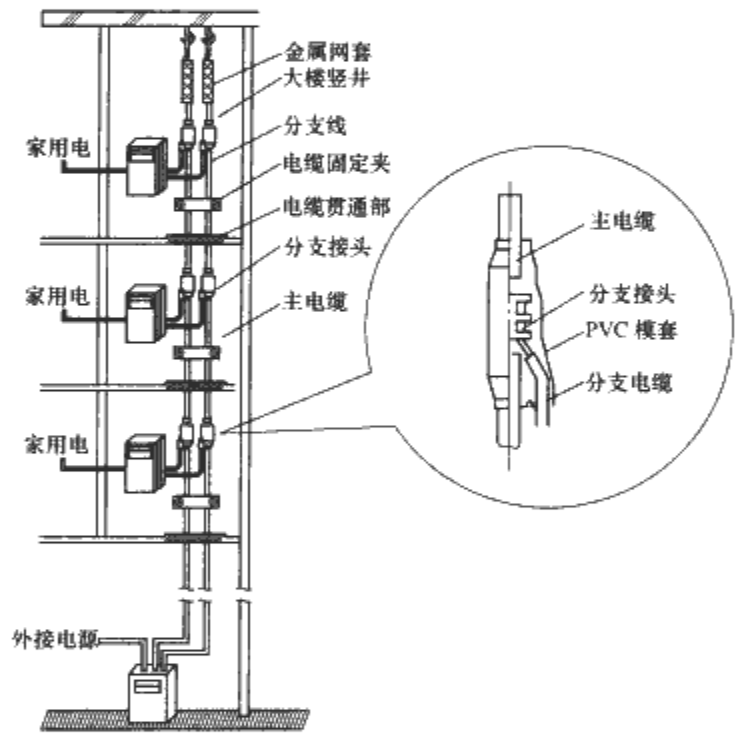


图 5.5-4　预制型分支电缆示意图

1）预制型分支电缆型号和规格。高层建筑用预制型分支电缆的型号、产品名称和规格参见表 5.5-75；电缆芯数、主干电缆和分支电缆截面规格见表 5.5-76，4 芯和 5 芯电缆的导体截面规格见表 5.5-77。其他截面规格的电缆由制造和使用双方协商。

表 5.5-75　预制型分支电缆的型号和产品名称

型　号	产　品　名　称
FZVV	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套预制分支电缆
FZYJV	铜芯交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套预制分支电缆
Z-FZVV	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套阻燃预制分支电缆
Z-FZYJV	铜芯交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套阻燃预制分支电缆
WDZ-FZYJY	铜芯交联聚乙烯绝缘无卤低烟聚烯烃护套阻燃预制分支电缆
N-FZYJV	铜芯交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套耐火预制分支电缆

表 5.5-76　预制型分支电缆的规格

型　号	芯　数	标称截面（mm^2）	
		主干电缆	分支电缆
FZVV、FZYJV Z-FZVV Z-FZYJV WDZ-FZYJY	1	16～800	4～240
	2	16～50	4～35
	3	16～50	4～35
	4	16～50	4～35
	5	16～50	4～35
N-FZYJV	1	16～120	6～70

注　分支电缆截面按用户要求配置，但1分支电缆截面或2分支电缆截面之和应不大于主干电缆截面。

表 5.5-77　预制型分支电缆规格的配合

主线（mm^2）	16	25	35	50
中线（mm^2）	10～16	16～25	16～35	16～50
地线（mm^2）	10～16	16～25	16～35	16～25

2）预制型分支电缆的试验。预制型分支电缆成品及起吊夹具性能要求见表 5.5-78。连接盒绝缘用注塑料机械、物理和电气性能要求参见表 5.5-79。

2.11　矿用橡套软电缆

矿用橡套软电缆主要用于煤矿，煤矿环境很差，作业面窄小，粉尘和有害气体很多，更严重的是电缆经常被机械外力侵害，电缆操作频繁，这些都影响电缆使用寿命。近期来煤炭工业还对电缆燃烧性能提出了很高的要求，使电缆制造成本、机械性能、阻燃性能和使用寿命等方面的矛盾难以妥善协调。当前电缆原则上仍按 GB 12972—1991《矿用橡套软电缆》标准制造，但为适应阻燃性能而使材料有所改变，此外还发展了一些塑料软电缆。GB 12972—1991 标准着重与机械性能，未强调阻燃性能，所以用户常要求按 MT 标准进行燃烧试验。GB 12972—1991 共包含 9 种产品。

（1）额定电压为 0.66/1.14 kV 及以下的采煤机软电缆，工作温度为 65℃，最小弯曲半径为电缆外径的 6 倍，护套颜色为黄色，电缆不得在日光下长期暴露。电缆型号、名称和规格见表 5.5-80。

（2）额定电压为 0.66/1.14 kV 的采煤机软电缆，工作温度为 90℃，小弯曲半径为电缆外径的 15 倍，电缆不得在日光下长期暴露。电缆型号、名称和规格见表 5.5-81。

（3）额定电压为 0.66/1.14kV 的采煤机金属屏蔽软电缆，工作温度为 90℃，小弯曲半径为电缆外径的 6 倍。电缆型号、名称和规格见表 5.5-82 。

（4）额定电压为 0.66/1.14kV 及以下的移动橡皮套软电缆，工作温度为 65℃，最小弯曲半径为电缆外径的 6 倍，黄色护套电缆不得在日光下长期暴露。电缆型号、名称和规格见表 5.5-83 。

（5）额定电压为 3.6/6kV 的屏蔽监视型软电缆，工作温度为 90℃，最小弯曲半径为电缆外径的 6 倍，电缆不得在日光下长期暴露，电缆的地线芯必须良好接地。电缆型号、名称和规格见表 5.5-84 。对内护套厚度不考核。

（6）额定电压为 3.6/6kV 的屏蔽橡套软电缆，工作温度为 90℃，最小弯曲半径为电缆外径的 6 倍，电缆地线芯

应良好接地。移动式地面矿山机械使用（如露天煤矿等）电缆型号、名称和规格见表5.5-85 。

（7）额定电压为0.3/0.5kV的矿用电钻电缆，工作温度为65℃，小弯曲半径为电缆外径的6倍。用于井下电钻与电源连接。电缆型号、名称和规格见表5.5-86 。

（8）矿用移动轻型橡套软电缆，工作温度为65℃，最小弯曲半径为电缆外径的6倍。电缆型号、名称和规格见表5.5-87。

（9）矿工帽灯电线，工作电压为5V，工作温度为65℃。电线型号、名称和规格见表5.5-88 。

（10）矿用电缆发展初期进行了很多研发工作，电缆设计考虑机械和电气保护，并通过冲击、压破、耐磨、过渡电阻和表面电晕等试验。近期MT/T标准对电缆燃烧性能提出了更高的要求。

表5.5-78　　预制型分支电缆的成品试验

序　号	试 验 项 目	单　位	性 能 要 求
1	导体连续性		导通
2	压缩连接后导体抗拉强度	%	下降率不大于原始值20%
3	分支连接盒结构检验 外观 导体对外绝缘的最薄点厚度 导体之间绝缘的最薄点厚度 绝缘剖面	 mm mm 	 整齐光洁 不小于电缆绝缘和护套厚度标称值之和 不小于2倍电缆绝缘厚度标称值 无气孔和杂质
4	分支连接盒空气或浸水电压试验 试验电压（交流5min） 浸水时间 试验结果	 V h 	 3500（交流） 不规定 不击穿
5	分支连接盒浸水电压试验 浸水时间 试验电压（交流5min） 试验结果	 h V 	 1 3500 不击穿
6	分支连接盒浸水绝缘电阻试验 浸水时间 测试电压 试验结果	 h V MΩ	 1 500～1000 >200
7	分支连接盒热循环试验 第25次热循环温升 第26～125次热循环温升	 ℃ ℃	 ≤75 不大于第25次热循环测定值加8
8	分支连接盒垂直燃烧试验 供火时间 自熄时间	 s s	 30 ≤15
9	起吊装置空气或浸水电压试验 试验电压（交流5min） 浸水时间 试验结果	 V h 	 3500 不规定 不击穿
10	起吊装置静负荷试验 负荷重量 负重时间 试验结果	 kg h 	 2倍预制分支电缆总重（总重由厂方提出） 24 不脱落
11	起吊装置浸水电压试验 试验电压（交流5min） 试验结果	 V 	 3500 不击穿
12	起吊装置浸水绝缘电阻试验 测试电压 试验结果	 V MΩ	 500～1000 >200
13	识别标志耐擦性		用沾水脱脂棉团轻擦10次仍可识别字迹

表 5.5-79　　连接盒绝缘用注塑料性能技术要求

序　号	项　目	单　位	性能要求		
			聚氯乙烯	阻燃聚氯乙烯	无卤聚烯烃
1	原始力学性能				
	抗张强度	MPa	≥10	≥10	≥5.5
	断裂伸长率	%	≥120	≥120	≥120
2	热老化后力学性能				
	老化温度	℃	100±2	100±2	100±2
	老化时间	h	168	168	168
	抗张强度最大变化率	%	±20	±20	±20
	断裂伸长率最大变化率	%	±20	±20	±20
3	冲击脆化性能试验				
	试验温度	℃	−15±0.5	−15±0.5	−10±0.5
	试验结果		通过	通过	通过
4	热变形试验				
	试验温度	℃	120±2	120±2	120±2
	试验结果	%	≤50	≤50	≤50
5	介电强度	MV/m	≥15	≥15	≥15
6	体积电阻率（20℃时）	Ω	$\geqslant 1.0\times10^{10}$	$\geqslant 1.0\times10^{10}$	$\geqslant 1.0\times10^{10}$
7	氧指数	%	—	≥30	≥30
8	pH 值	—	—	—	≥4.3
9	电导率	μS/mm	—	—	≤10

表 5.5-80　　采煤机软电缆型号、名称和规格

型　号	产品名称	芯数×导体标称截面（mm^2）			标称厚度（mm）	
		主线芯	地线芯	控制线芯	主线芯绝缘	外护套
UC—0.33/0.66 UCP—0.33/0.66	采煤机橡套软电缆 采煤机屏蔽橡套软电缆	3×16	1×4	3×2.5	1.6	4.5
		3×25	1×6	4×2.5	1.8	5.5
		3×35	1×6	4×4	1.8	5.5
		3×50	1×10	7×4	2.0	5.5
UCP—0.66/1.14	采煤机屏蔽橡套软电缆	3×35	1×6	3×6	2.0	6.0
		3×50	1×10	3×6	2.2	7.0
		3×70	1×16	3×6	2.2	7.0
		3×95	1×25	3×10	2.4	7.0

表 5.5-81　　采煤机屏蔽监视加强型软电缆型号、名称和规格

型　号	产品名称	芯数×导体标称截面（mm^2）			标称厚度（mm）	
		主线芯	地线芯	控制线芯	主线芯绝缘	外护套
UCPJB—0.66/1.14	采煤机屏蔽监视编织加强型橡套软电缆	3×35	1×16	3×2.5	2.0	3.0
		3×50	1×25	3×2.5	2.2	3.5
UCPJR—0.66/1.14	采煤机屏蔽监视绕包加强型橡套软电缆	3×70	1×35	3×2.5	2.2	3.5
		3×95	1×50	3×2.5	2.4	4.0

表 5.5-82　　采煤机金属屏蔽软电缆型号、名称和规格

型　号	产品名称	芯数×导体标称截面（mm^2）			标称厚度（mm）	
		主线芯	地线芯	监视线芯	主线芯绝缘	外护套
UCPT—0.66/1.14	采煤机金属屏蔽软电缆	3×16	1×16	1×16	1.5	5.0
		3×25	1×16	1×16	1.6	5.0
		3×35	1×16	1×16	1.6	5.0
		3×50	1×25	1×25	1.7	5.3
		3×70	1×35	1×35	1.8	5.8
		3×95	1×50	1×50	2.0	6.4

表 5.5-83 矿用移动橡皮套软电缆型号、名称和规格

型 号	产 品 名 称	芯数×导体标称截面（mm²）		标称厚度（mm）	
		主线芯	地线芯	主线芯绝缘	外护套
UY—0.33/0.66 UYP—0.33/0.66	矿用移动橡皮套软电缆 矿用移动屏蔽橡皮套软电缆	3×4	1×4	1.4	3.5
		3×6	1×6	1.4	3.5
		3×10	1×10	1.6	4.0
		3×16	1×10	1.6	4.0
		3×25	1×16	1.8	4.5
		3×35	1×16	1.8	4.5
		3×50	1×16	2.0	5.0
		3×70	1×25	2.0	5.0
UYP—0.66/1.14	矿用移动屏蔽橡皮套软电缆	3×10	1×10	1.8	4.5
		3×16	1×10	1.8	4.5
		3×25	1×16	2.0	5.0
		3×35	1×16	2.0	5.0
		3×50	1×16	2.2	5.5
		3×70	1×25	2.2	5.5
		3×95	1×25	2.4	6.0

表 5.5-84 矿用屏蔽监视型软电缆型号、名称和规格

型 号	产 品 名 称	芯数×导体标称截面（mm²）			标称厚度（mm）		
		主线芯	地线芯	监视线芯	主线芯绝缘	内护套	外护套
UYPJ3.6/6	矿用移动屏蔽监视型橡套软电缆	3×25	3×16/3	3×2.5	4.0	2.5	5.5
		3×35	3×16/3	3×2.5	4.0	2.5	5.5
		3×50	3×25/3	3×2.5	4.0	2.5	5.5

表 5.5-85 屏蔽橡套软电缆型号、名称和规格

型 号	产 品 名 称	芯数×导体标称截面（mm²）		标称厚度（mm）	
		主线芯	地线芯	主线芯绝缘	外护套
UYP—3.6/6 UYPT—3.6/6	矿用移动屏蔽橡套软电缆 矿用移动金属屏蔽橡套软电缆 （最低环境温度为—20℃）	3×16	1×16	4.0	5.5
		3×25	1×16		
		3×35	1×16		
		3×50	1×25		
UYPD—3.6/6 UYPTD—3.6/6	矿用移动屏蔽橡皮套软电缆 矿用移动金属屏蔽橡皮套软电缆 （最低环境温度为—40℃）	3×16	1×16	4.0	5.5
		3×25	1×16		
		3×35	1×16		
		3×50	1×25		

表 5.5-86 矿用电钻电缆型号、名称和规格

型 号	产 品 名 称	芯数×导体标称截面（mm²）			标称厚度（mm）	
		主线芯	地线芯	监视线芯	主线芯绝缘	外护套
UZ—0.3/0.5 UZP—0.3/0.5	矿用电钻电缆 矿用屏蔽电钻电缆	3×2.5	1×2.5	—	1.0	3.5
		3×4	1×4	—		
		3×2.5	1×2.5	1×2.5		
		3×4	1×4	1×4		

表 5.5-87 矿用移动轻型橡套软电缆电缆型号、名称和规格

型 号	产品名称	芯数×导体标称截面（mm²）	绝缘标称厚度（mm）	护套标称厚度（mm）
UYQ—0.3/0.5	矿用移动轻型橡套软电缆	2×1.0	0.6	1.5
		2×1.5	0.8	1.5
		2×2.5	1.0	1.5
		3×1.0	0.6	1.5
		3×1.5	0.8	1.5
		3×2.5	1.0	1.5
		4×1.0	0.6	1.5
		4×1.5	0.8	1.5
		4×2.5	1.0	2.0
		7×1.0	0.6	1.5
		7×1.5	0.8	2.0
		7×2.5	1.0	2.0
		12×1.0	0.6	2.0
		12×1.5	0.8	2.5
		12×2.5	1.0	2.5

表 5.5-88 矿工帽灯电线型号、名称和规格

型号	产品名称	芯数×导体标称截面（mm²）	绝缘标称厚度（mm）	护套标称厚度（mm）
UM	矿工帽灯电线	2×0.75	0.4	1.2
UM—1	矿工帽灯电线（阻燃性）	2×1.2	0.5	1.3

2.12 潜油泵电缆

潜油泵电缆主要用于油井电泵的供电或引接，该品种也适用于潜水泵和潜卤泵，分3个系列，目前按JB 5332—1991《额定电压3.6/6V及以下电动潜油泵电缆》标准制造。

（1）电动潜油泵引接电缆的型号和产品名称见表5.5-89，有关使用需要的基本参数见表5.5-90，结构参数见表5.5-91。

（2）电动潜油泵扁形电力电缆的型号和产品名称见表5.5-92，有关使用需要的基本参数见表5.5-93，结构参数见表5.5-94。

（3）电动潜油泵圆形电力电缆的型号和产品名称见表5.5-95，有关使用需要的基本参数见表5.5-96，结构参数见表5.5-97。

表 5.5-89　　潜油泵引接电缆型号和产品名称

型　号	产　品　名　称
WQJYEN10	聚酰亚胺－F46薄膜/乙丙橡皮组合绝缘丁腈橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵引接电缆
WQJYEE10	聚酰亚胺－F46薄膜/乙丙橡皮组合绝缘乙丙橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵引接电缆
WQJYEH10	聚酰亚胺－F46薄膜/乙丙橡皮组合绝缘氯磺化聚乙烯内护套裸钢带联锁铠装潜油泵引接电缆
WQJYEQ10	聚酰亚胺－F46薄膜/乙丙橡皮组合绝缘铅内护套裸钢带联锁铠装潜油泵引接电缆
WQJYFQ10	聚酰亚胺－F46薄膜/可熔性四氟乙烯组合绝缘铅内护套裸钢带联锁铠装潜油泵引接电缆

表 5.5-90　　潜油泵引接电缆的基本参数

型　号	额定电压 (kV)	标称截面 (mm^2)	导体工作温度 (℃)	允许井下温度 (℃)	20℃绝缘电阻 (MΩ·km)
WQJYEN10	1.8/3	10.0、13.3、16.0、20.0	175	120	≥750
	3.6/6	16.0			
WQJYEE10	1.8/3	10.0、13.3、16.0、20.0			
WQJYEH10	1.8/3				
WQJYEQ10	1.8/3				
WQJYFQ10	1.8/3		200	150	

表 5.5-91　　潜油泵引接电缆的结构参数

额定电压 (kV)	标称截面 (mm^2)	导体结构 根数/直径 (mm)	绝缘 标称厚度 (mm)	内护套 标称厚度 (mm)	钢带 标称厚度 (mm)	电缆 外形尺寸 (mm)	导体直流电阻 (Ω/km)（20℃时）
1.8/3	10.0	1/3.67	1.0	0.8	0.3	12×30	1.83
	13.3	1/4.12				12.5×31	1.386
	16.0	1/4.60				13×36	1.15
	20.0	1/5.19				15×39	0.84
3.6/6	16.0	1/4.60	1.6	0.8	0.4	13×37.4	1.15

表 5.5-92　　潜油泵扁形电力电缆型号和产品名称

型　号	产　品　名　称
WQPN10	聚丙烯绝缘丁腈橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵扁形电力电缆
WQPF10	聚丙烯绝缘丁腈聚氯乙烯内护套裸钢带联锁铠装潜油泵扁形电力电缆
WQPN12	聚丙烯绝缘丁腈橡皮内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵扁形电力电缆
WQPF12	聚丙烯绝缘丁腈聚氯乙烯内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵扁形电力电缆
WQYJN10	交联聚乙烯绝缘丁腈橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵扁形电力电缆
WQYJN12	交联聚乙烯绝缘丁腈橡皮内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵扁形电力电缆
WQEN10	乙丙橡皮绝缘丁腈橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵扁形电力电缆
WQEN12	乙丙橡皮绝缘丁腈橡皮内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵扁形电力电缆
WQEE10	乙丙橡皮绝缘乙丙橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵扁形电力电缆
WQEE12	乙丙橡皮绝缘乙丙橡皮内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵扁形电力电缆
WQEH10	乙丙橡皮绝缘氯磺化聚乙烯内护套裸钢带联锁铠装潜油泵扁形电力电缆
WQEH12	乙丙橡皮绝缘氯磺化聚乙烯内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵扁形电力电缆
WQEQ10	乙丙橡皮绝缘铅内护套裸钢带联锁铠装潜油泵扁形电力电缆

表 5.5-93　　潜油泵扁形电力电缆的基本参数

型　号	额定电压 (kV)	芯　数	标称截面 (mm^2)	导体工作温度 (℃)	允许井下温度 (℃)	绝缘电阻 (MΩ·km)（20℃时）
WQPN10、WQPF10、WQPN12、WQPF12、WQYJN10、WQYJN12	1.8/3 3.6/6	3	16.0 20.0 33.5 42.5	100	90	≥500
WQEN10、WQEN12				140	120	未定
WQEE10、WQEE12、WQEH10、WQEH12、WQEQ10	1.8/3 3.6/6	3	16.0 20.0	150	120	未定

表 5.5-94　　潜油泵扁形电力电缆的结构参数

额定电压（kV）	标称截面（mm²）	导体结构根数/直径（mm）	结构厚度标称值（mm）				电缆外形尺寸（mm）		导体电阻（Ω/km）（20℃时）	
			绝缘	内护套	钢带	外护套	无护套	有护套	不镀锡	镀锡
1.8/3	16.0	1/4.62	1.9	1.8	0.5	1.0	17×40	23×46	1.15	1.16
	20.0	1/5.19					18×42	24×48	0.84	0.86
	33.5	7/2.47					20×48	26×54	0.54	0.56
	42.5	19/1.69					21×52	27×58	0.43	0.44
3.6/6	16.0	1/4.62	2.3	1.8	0.5	1.0	18×42	24×48	1.15	1.16
	20.0	1/5.19					19×44	25×50	0.84	0.86
	33.5	7/2.47					21×50	27×56	0.54	0.56
	42.5	19/1.69					22×54	28×60	0.43	0.44

表 5.5-95　　潜油泵圆形电力电缆型号和产品名称

型　号	产　品　名　称
WQPNY10	聚丙烯绝缘丁腈橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵圆形电力电缆
WQPFY10	聚丙烯绝缘丁腈聚氯乙烯内护套裸钢带联锁铠装潜油泵圆形电力电缆
WQPNY12	聚丙烯绝缘丁腈橡皮内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵圆形电力电缆
WQPFY12	聚丙烯绝缘丁腈聚氯乙烯内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵圆形电力电缆
WQYJNY10	交联聚乙烯绝缘丁腈橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵圆形电力电缆
WQYJNY12	交联聚乙烯绝缘丁腈橡皮内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵圆形电力电缆
WQENY10	乙丙橡皮绝缘丁腈橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵圆形电力电缆
WQENY12	乙丙橡皮绝缘丁腈橡皮内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵圆形电力电缆
WQEEY10	乙丙橡皮绝缘乙丙橡皮内护套裸钢带联锁铠装潜油泵圆形电力电缆
WQEEY12	乙丙橡皮绝缘乙丙橡皮内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵圆形电力电缆
WQEHY10	乙丙橡皮绝缘氯磺化聚乙烯内护套裸钢带联锁铠装潜油泵圆形电力电缆
WQEHY12	乙丙橡皮绝缘氯磺化聚乙烯内护套钢带联锁铠装聚氯乙烯外护套潜油泵圆形电力电缆

表 5.5-96　　潜油泵圆形电力电缆的基本参数

型　号	额定电压（kV）	芯　数	标称截面（mm²）	导体工作温度（℃）	允许井下温度（℃）	绝缘电阻（MΩ·km）（20℃时）
WQPNY10、WQPFY10、WQPNY12、WQPFY12、WQYJNY10、WQYJNY12	1.8/3 3.6/6	3	16.0 20.0 33.5 42.5	100	90	≥2000
WQENY10、WQENY12				140	120	未定
WQEEY10、WQEEY12、WQEHY10、WQEHY12				150	120	未定

表 5.5-97　　潜油泵圆形电力电缆的结构参数

额定电压（kV）	标称截面（mm²）	导体结构根数/直径（mm）	结构厚度标称值（mm）				电缆外形尺寸（mm）		导体电阻（Ω/km）（20℃时）	
			绝缘	内护套	钢带	外护套	无护套	有护套	不镀锡	镀锡
1.8/3	16.0	1/4.62	1.9	1.8	0.5	1.0	31.0	35.0	1.15	1.16
	20.0	1/5.19					32.0	36.0	0.84	0.86
	33.5	7/2.47					38.4	42.4	0.54	0.56
	42.5	19/1.69					44.0	44.0	0.43	0.44
3.6/6	16.0	1/4.62	2.3	1.8	0.5	1.0	32.0	36.0	1.15	1.16
	20.0	1/5.19					34.0	40.0	0.84	0.86
	33.5	7/2.47					40.4	44.4	0.54	0.56
	42.5	19/1.69					42.0	46.0	0.43	0.44

2.13　承荷探测电缆

承荷探测电缆用于各类油矿的探测，如油、气井的测量和射孔等作业，也可用于其他类似的探测工作。目前按 JB/T 3302—1999《承荷探测电缆》标准制造。承荷探测电缆型号和名称见表 5.5-98，有关使用需要的基本参数见表 5.5-99，允许使用温度见表 5.5-100，主要技术指标见表 5.5-101。双钢丝铠装层的回弹试验也是重要性能，解决这项性能要求，对双钢丝铠装工序的钢丝预扭处理曾进行大量的验证，并解决了制造技术。高温高压力径向密封试验过去曾令人担忧，为此设计了专用的可控高温度和高压力试验装置，其最高压力可达 300MPa，最高温度可达 350℃，并对多种结构电缆进行了验证试验。当前 JB/T 3302—1999 标准中仍保留了这项试验，而实际上国内已无条件进行这项试验，今后修订标准时，可考虑调整。

各类油井的探测及其正常作业还需要其他类型的电缆，将来光纤也有可能介入，最后将会形成综合性类型的产品。

表 5.5-98　承荷探测电缆型号和产品名称

型　号	产　品　名　称
W7UX	7 芯天然—丁苯橡皮绝缘双钢丝铠装承荷探测电缆
W7E	7 芯乙丙橡皮绝缘双钢丝铠装承荷探测电缆
W7B	7 芯乙烯丙烯共聚物或改性聚丙烯绝缘双钢丝铠装承荷探测电缆
W7BP	7 芯乙烯丙烯共聚物或改性聚丙烯绝缘总屏蔽双钢丝铠装承荷探测电缆
W7BPP	7 芯乙烯丙烯共聚物或改性聚丙烯绝缘分相屏蔽总屏蔽双钢丝铠装承荷探测电缆
W7F46	7 芯全氟乙烯丙烯共聚物绝缘双钢丝铠装承荷探测电缆
W7F46P	7 芯全氟乙烯丙烯共聚物绝缘总屏蔽双钢丝铠装承荷探测电缆
W7F46PP	7 芯全氟乙烯丙烯共聚物绝缘分相屏蔽总屏蔽双钢丝铠装承荷探测电缆

表 5.5-99　承荷探测电缆的基本参数

型号	计算截面 (mm^2)	额定拉断力 (kN)	标称制造长度 (m)						
W7X	0.56	44	—	—	—	5500	4200	3500	2200
W7E		59	—	—	—	5500	4200	3500	2200
W7B		59	—	—	—	5500	4200	3500	2200
W7BP		59	—	—	—	5500	4200	3500	2200
W7BPP		59	—	—	—	5500	4200	3500	2200
W7F46		69	8000	7500	6500	5500	4200	3500	2200
W7F46P		69	8000	7500	6500	5500	4200	3500	2200
W7F46PP		69	8000	7500	6500	5500	4200	3500	2200

表 5.5-100　承荷探测电缆的允许使用温度

型　号	使用温度范围 (℃)	
	最　低	短时一次停留<2h
W7X	−40	90
W7E	−40	150
W7B	−30	150
W7BP	−30	150
W7BPP	−30	150
W7F46	−50	232
W7F46P	−50	232
W7F46PP	−50	232

表 5.5-101　承荷探测电缆主要技术指标

序号	试　验　项　目	单位	技术指标
1	电缆外径：标称值及允许公差	mm	12.0，+5%
2	拉断力	kN	≥表 5.5-99 规定
3	残余伸长率	%	≤0.2
4	导体直流电阻（20℃时）	Ω/km	≤36
5	电压试验：工频 5min（导体间；导体与铠装间）	V	1000 不击穿
6	绝缘电阻：（导体之间；导体铠装之间）		
	20℃ W7X	MΩ	≥100
	20℃ W7E	MΩ	≥200
	20℃其他型号	MΩ	≥500
7	电容：800～1000Hz 1 芯对所有其余芯加铠装		
	W7B，W7BP，W7BPP，W7F46，W7F46P，W7F46PP	μF/km	≤0.19

注　其他型式试验详见 JB/T 3302—1999。

2.14　热电偶用补偿导线

热电偶用补偿导线在一定温度范围内（包括常温），具有与所适配热电偶的热电动势（标称值）相同的一对带有绝缘层的导线。用补偿导线连接热偶与测量装置，可补偿与热电偶连接处的温度。这类导线又分为延长型和补偿型 2 种。目前按 GB/T 4989—1994 标准制造。该标准的产品适用的热电偶及其分度号为：S、R、K、N、E、J 和 T 等。热电偶用补偿导线的型号见表 5.5-102，但这部分仅是与导体品种相关的符号。至于有关电缆的绝缘、屏蔽、护套、铠装结构以及其他特征相关的符号，原则上套用一般电线电缆常用的符号。导体结构见表 5.5-103。

表 5.5-102　热电偶用补偿导线的型号和名称

型号	名　称	适合配用的热电偶	分度号
SC 或 RC	铜—铜镍 0.6 补偿型导线	铂铑 10—铂热电偶；铂铑 13—铂热电偶	S 或 R
KCA	铁—铜镍 22 补偿型导线；	镍铬—镍硅热电偶	K
KCB	铜—铜镍 40 补偿型导线；		K
KX	镍铬 10—镍硅 3 延长补偿型导线		K
NC	铁—铜镍 18 补偿型导线；	镍铬硅—镍硅热电偶	N
NX	镍铬 14 硅—镍硅延长型导线		N
EX	镍铬 10—铜镍 45 延长型导线	镍铬—铜镍热电偶	E
JX	铁—铜镍 45 延长型导线	铁—铜镍热电偶	J
TX	铜—铜镍 45 延长型导线	铜—康铜热电偶	T

表 5.5-103　热电偶用补偿导线的导体结构

线芯结构	标称截面 (mm^2)	单线根数	单线直径 (mm)
实　心	0.2	1	0.52
	0.5		0.80
	1.0		1.13
	1.5		1.37
	2.5		1.76

续表

线芯结构	标称截面 (mm^2)	单线根数	单线直径 (mm)
绞 线	0.2	7	0.20
	0.5	7	0.30
	1.0	7	0.43
	1.5	7	0.52
	2.5	19	0.41

2.15 控制和信号电缆及其技术进步

20世纪60年代时期，工程建设的自动化控制系统大多数采用传统聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆和信号电缆，控制电缆型号以KVV系列为代表，当时电缆的主要功能是连接继电器、断路器和小型电机等，工作电压属于强电范围。另一部分是连接指针式仪表和低压信号灯等，工作电压低于50V，过去称信号电缆（不同于电气铁道用信号电缆）。到20世纪80年代，我国大规模现代化工程的建设、自动化系统的高精度控制和计算机技术的应用，使这类电缆在品种数和需求量方面有了很大的发展，同时出现了好几个名称，如仪表电缆、本安电缆、计算机电缆、数字传输控制电缆和总线电缆等等。尽管名称、功能有所差异，但从本质上说，均属于弱电传输，可归结于“模拟传输”和“数字传输”2种方式。由于工程建设的通用性，这类电缆并不与通信电缆要求相同，所以不认同归属于通信电缆。当前各设计单位和各电缆制造厂所用的产品名称众多，型号也无法统一，使用环境差异较大，要制订一项统一的标准，并不切合实际。IEC 189聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套低频电缆和电线是可参考的标准，但聚氯乙烯电性差，耐热性也不及交联聚乙烯，该标准未规定额定电压等级（含义是限用于弱电系统）。IEC 92—375是船用仪表和通信电缆标准，在交流或直流60V及以下工作，但在故障情况下也能在交流或直流250V及以下正常工作。这份标准的导体规格小，绝缘厚度较薄，而且不规定单元屏蔽，所以也不可等效采用。由控制（含信号）电缆产品设计原则分析，可归纳以下几点：

（1）由于这类电缆常与电力存在无形的联系，广大用户要求电缆的额定电压为600/1000V；300/500V；250V，个别为50V。

（2）导体可采用铜线、镀锡铜线、镀银铜线及镀镍铜线等。导体截面一般为0.5～2.5mm^2，导体可为1类（单根）或2类（7根或19根）结构。个别情况用户需要5类结构。

（3）绝缘按使用要求而定，如聚氯乙烯、聚乙烯、交联聚乙烯、无卤低烟交联聚烯烃、乙丙橡皮、无卤低烟乙丙橡皮、硅橡皮、交联F40、F46、F4、氧化镁等。并按此规定使用温度。绝缘厚度可为0.5～0.8mm。

（4）按使用要求绝缘芯可对绞、三线组绞和四线组绞。芯数可为2～61，对数可为1～48，三线组可为2～37，四线组可为2～24。也允许混合对、组并存。

（5）按使用要求可单元屏蔽，通常用聚酯—铝薄膜绕包，并加截面不小于0.5mm^2的镀锡铜绞线作为引接线。不允许用聚酯—铝薄膜绕包式屏蔽的情况，则用铜线或镀锡铜线编织。

（6）成缆后的包带或挤内护套应满足使用要求，材料应与绝缘耐温等级适配。

（7）按使用要求可无或有总屏蔽，总屏蔽一般应采用编织屏蔽，直径大的电缆可用铜带搭盖绕包，其外再反向稀疏缠绕铜线。

（8）按使用要求挤外护套，材料应与绝缘耐温等级适配。

（9）除特殊要求外，大部分情况不需要铠装。

（10）其他特征参数如：工作电容、电容不平衡、电感与电阻比和衰减、测试频率和测试方法等由制造商与设计部门协商。

2.16 公路车辆用低压电线和电缆

公路车辆用低压电线（简称汽车低压电线），通常先按照汽车布线模板的要求加工成线束，然后将线束安装到汽车上。汽车线束市场不但与汽车产量直接有关，并且与单台车辆配线数量密切相关，一辆低档轿车平均用低压电线为800m，一辆中档轿车平均用量为1500m，一辆豪华名车用量达2500m。目前汽车低压电线的绝缘仍以聚氯乙烯为主，但有些部位需要用交联聚烯烃、热塑弹性体、乙丙橡胶、硅橡胶甚至氟塑料等。汽车低压电线的导体，除马达线考虑用铝导体外，其他都用铜导体。随着技术发展，希望导体截面进一步缩小，如0.10mm^2及以下，铜的机械强度不能满足安装要求，现正在考虑用铜包钢线。JB/T 8139—1999《公路车辆用低压电缆（电线）》标准的品种较少，不能完全满足使用要求，各汽车制造公司均有自己的电线采购规范。当前中国汽车行业协会制订的标准也以聚氯乙烯薄绝缘低压电线为主，但实际上交联聚烯烃和硅橡胶绝缘低压电线的应用数量也不少。

（1）汽车低压电线电缆的型号、名称和用途参见表5.5-104（摘自JB/T 8139—1999）。

（2）汽车低压电线电缆结构尺寸见表5.5-105和表5.5-106。

（3）汽车低压电缆性能试验项目很多，结构尺寸方面有导体结构、绝缘厚度、护套厚度、成品外径等检验。电气性能方面有导体电阻、绝缘电阻、30min工频耐电压试验、单芯电缆的工频击穿电压等。物理性能方面有高温压力试验、热收缩试验、低温卷绕试验（16mm^2及以下）、低温冲击试验（16mm^2以上）、燃烧试验、过热试验（加热48h）、绝缘附着力试验（2.5mm^2及以下）、绝缘剥离试验、绝缘刮磨试验等。化学性能方面有耐机油试验、耐燃料油试验等。外观方面有表面光洁平整、绝缘线芯颜色识别、成品颜色识别及其标志等，由于线束中的单线识别很重要，而且各汽车制造厂的规定也不完全相同，这使得电缆厂安排生产计划时会影响经济效益。当前引进的电线高速挤出设备同时具有电线在很短长度内快速换色的功能，有效地提高了成品收获率。

（4）有关国外汽车低压电缆标准中薄绝缘电线尺寸见表5.5-107。

（5）ISO汽车低压电缆标准的试验概括见表5.5-108。

（6）高档汽车要求信号传输质量高，数字传输电缆以及光纤已有使用，其要求与通信电缆和光缆基本相同。因为布线距离短，衰减可适当放宽，但传输质量要求不应降低。

表5.5-104 汽车低压电缆的型号、名称和规格

型 号	产 品 名 称	主 要 用 途
QVR	公路车辆用铜芯聚氯乙烯绝缘低压电缆	电器和仪表线路用
QFR	公路车辆用铜芯聚氯乙烯—丁腈复合物绝缘低压电缆	电器和仪表线路用
QVR—105	公路车辆用铜芯耐热105℃聚氯乙烯绝缘低压电缆	高温区电器和仪表线路用
QVVR	公路车辆用铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套低压电缆	车辆与挂车间电路器线路用

表 5.5-105　　汽车低压单芯电缆结构尺寸

导体标称截面 (mm^2)	根数/单线标称直径 (mm)	绝缘标称厚度 (mm)	平均外径上限 (mm)	导体电阻(Ω/km)(20℃时)	
				铜芯不大于	镀锡铜芯不大于
0.2	12/0.15	0.3	1.3	92.3	95.0
0.3	16/0.15	0.3	1.4	69.2	71.2
0.4	23/0.15	0.3	1.6	48.2	49.6
0.5	16/0.20	0.6	2.4	39.0	40.1
0.75	24/0.20	0.6	2.6	26.0	26.7
1.0	32/0.20	0.6	2.8	19.6	20.0
1.5	30/0.25	0.6	3.1	13.3	13.7
2.5	49/0.25	0.7	3.7	7.98	8.21
4	56/0.30	0.8	4.5	4.95	5.09
6	84/0.30	0.8	5.1	3.30	3.39
10	80/0.40	1.0	6.7	1.91	1.95
16	126/0.40	1.0	8.5	1.21	1.24
25	196/0.40	1.3	10.6	0.780	0.795
35	276/0.40	1.3	11.8	0.554	0.565
50	396/0.40	1.5	13.7	0.386	0.393
70	360/0.50	1.5	15.7	0.272	0.277
95	475/0.50	1.6	18.2	0.206	0.210
120	608/0.50	1.6	19.9	0.161	0.164

表 5.5-106　　汽车低压多芯电缆结构尺寸

导体标称截面 (mm^2)	根数/单线标称直径 (mm)	绝缘标称厚度		护套标称厚度 (mm)	平均外径(mm)	
		2.5 (mm^2)	1.5 (mm^2)		下限	上限
1×2.5+6×1.5	49/0.25+30/0.25	0.5 (mm)	0.6 (mm)	1.5	11.0	13.5

表 5.5-107　　有关国外标准中薄绝缘电线的尺寸规定　　mm

标准名称	名　称	截　面 (mm^2)									
		0.22	0.30	0.35	0.50	0.60	0.75	0.80	0.85	1.00	1.25
SAE	标称绝缘厚度	0.40	—	0.40	0.40	—	—	0.40	—	0.40	—
	最小绝缘厚度	0.28	—	0.28	0.28	—	—	0.28	—	0.28	
	最大成品外径	1.50	—	1.70	1.90	—	—	2.20	—	2.40	—
JASO	标称绝缘厚度	—	0.5	—	0.5	—	—	—	0.5	—	0.5
	最小绝缘厚度	—	0.32	—	0.32	—	—	—	0.32	—	0.32
	最大成品外径	—	1.9	—	2.1	—	—	—	3.2	—	2.6
DIN	标称绝缘厚度	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	最小绝缘厚度	—	—	0.20	0.22	—	0.24	—	—	0.24	—
	最大成品外径	—	—	1.3	1.6	—	1.9	—	—	2.1	—
PSA	标称绝缘厚度	0.22	—	0.28	—	0.35	—	—	—	0.38	—
	最小绝缘厚度	0.18	—	0.22	—	0.28	—	—	—	0.30	—
	最大成品外径	1.20	—	1.35	—	1.86	—	—	—	2.10	—
ISO	标称绝缘厚度	—	—	—	0.6	—	0.6	—	—	0.6	—
	最小绝缘厚度	—	—	—	0.44	—	0.44	—	—	0.44	—
	最大成品外径	—	—	—	2.3	—	2.5	—	—	2.7	—

表 5.5-108　　ISO 电缆试验项目

序号	试　验　项　目	电缆分类及最高工作温度（℃）						
		A	B	C	D	E	F	
		85	100	125	155	175	200	
1	绝缘缺陷试验	电缆线芯通过火花试验机不发生击穿						
2	电缆外径	测量值均应不超过规定值						
3	绝缘厚度测量	测量值均应不低于最小绝缘厚度规定						
4	导体直径测量	测量值均应不超过导体最大直径规定						
5	导体电阻	不超过规定值						
6	电压试验	不击穿						
7	绝缘电阻	体积电阻率不小于 1000MΩ · mm						
8	高温压力试验	电压试验不击穿						
9	绝缘和导体的附着力	A	B	C		D	E	F
				C1	C2			
	$S\leqslant 0.75mm^2$	5～30N			5～50N	5～30N		
	$0.75<S\leqslant 1.5mm^2$	5～40N			5～75N	5～40N		
	$1.5<S\leqslant 2.5mm^2$	10～50N			20～100N	10～50N		
	$2.5<S\leqslant 6mm^2$	10～70N			30～120N	10～70N		
10	绝缘剥离试验	符合使用要求						
11	老化前低温卷绕试验	绝缘不开裂，电压试验不击穿（－40℃±2℃）						
12	短期老化后低温卷绕试验	绝缘不开裂，电压试验不击穿（－25℃±2℃）						
13	低温冲击试验	绝缘不开裂，电压试验不击穿（－15℃±2℃）						
14	长期老化后卷绕和冲击试验	绝缘不开裂，电压试验不击穿（新产品要求）						
15	热过载试验	考虑之中						
16	热收缩试验	每端最大收缩长度不超过 2mm						
17	阻燃试验	A	B	C		D	E	F
				C1	C2			
	供火时间（s）	30			15	30		
	熄火时间（s）	30			70	30		
18	耐液体试验	绝缘不开裂，电压试验不击穿						
19	标志耐擦试验	电缆标记保持字迹清晰						
20	耐磨试验	最低耐磨次数符合供需方协议						
21	绝缘热稳定试验	30min 内，试验变色不超过从 pH5～pH3						

注　1. 若供需方协商同意，A 级和 B 级试验温度可改为 －25℃。

2. C1 和 C2 同属于 C 级，二者仅是对现有产品阻燃试验要求之差异。

2.17 公路车辆用高压点火电线

公路车辆用高压点火电线（以下简称高压点火线）是汽车配套组件。GB/T 14820.1～.3—1993 标准《公路车辆用高压点火电线》部分等效采用 ISO 3808/1—1979（E）和 ISO 3808/2—1980（E）标准。

高压点火线的工作条件很苛刻，使用时会遇到严寒、酷热、高湿、干旱、颠簸，振动、摩擦和拉力等因素，此外还有接触汽油、机油以及酸液的可能性。点火线是在基本封闭的壳内工作，并接近汽缸，实际温度较高。这些因素要求高压点火应具有优越的机械和理化性能。点火线圈输出脉冲电压峰值达 20000V 以上，虽然击穿的可能性不大，但有可能发生绝缘表面电晕和线芯表面局部放电，所以点火线要经受较高的电压试验和电晕试验，并且经过多项理化试验后，最终都要通过电压试验来考核，其意义是要求绝缘经受各种严酷条件侵害后必须保证其点火功能正常。气缸点火时，无屏蔽点火线相当于一根无线电波发射的天线，对周围环境产生无线电波污染，在有线电视网未普及时，用天线接受电视节目，当附近有汽车经过时，电视图象就出现强烈的干扰，影响正常收看。而阻尼高压点火线有抑制无线电波对外发射功能，与金属线芯对比对外干扰明显减弱，不过其电阻也降低了点火能量，甚至不能正常点火而影响车速。目前许多汽车设计，已采取了防止汽车产生无线电波污染措施，从而阻尼高压点火线使用量渐渐萎缩。

（1）高压点火线的型号和名称及其工作温度见表 5.5-109。GB/T 14820 与 ISO 3808/1～2 比较，缺少 120（或 125）℃及以上的等级品种，采用耐温更高的绝缘和护套材料就可填补上述的温度范围。如 120℃可用乙丙橡胶—聚丙烯热塑弹性体，125～155℃可用可交联聚烯烃，180℃可用硅橡胶，155℃及以上也可用氟塑料。特殊情况可用聚酰亚胺薄膜等。

表 5.5-109 汽车用高压点火线的型号和产品名称

型 号	产 品 名 称	最高工作温度（℃）
QGV	公路车辆用铜芯聚氯乙烯绝缘高压点火电线	70
QGF	公路车辆用铜芯聚氯乙烯—丁腈复合物绝缘高压点火电线	70
QGV—105	公路车辆用铜芯耐热 105℃聚氯乙烯绝缘高压点火电线	105
QGXF	公路车辆用铜芯天然—丁苯橡皮绝缘氯丁护套高压点火电线	70
QGXV	公路车辆用铜芯天然—丁苯橡皮绝缘聚氯乙烯护套高压点火电线	70
QGZV	公路车辆用阻尼芯聚氯乙烯绝缘高压点火电线	70
QGZF	公路车辆用阻尼芯聚氯乙烯—丁腈复合物绝缘高压点火电线	70
QGZV—105	公路车辆用阻尼芯耐热 105℃聚氯乙烯绝缘高压点火电线	105
QGZXF	公路车辆用阻尼芯天然—丁苯橡皮绝缘氯丁护套高压点火电线	70
QGZXV	公路车辆用阻尼芯天然—丁苯橡皮绝缘聚氯乙烯护套高压点火电线	70

（2）铜芯和阻尼芯高压点火线的结构尺寸见表 5.5-110 和表 5.5-111。

（3）工频电压性能试验见表 5.5-112 。

（4）物理性能试验见表 5.5-113，这些试验最后按表 5.5-112 的规定进行耐电压试验。

（5）热收缩试验温度为 155℃±2℃，持续 15min ，电线收缩不超过 2%，表面应无裂纹。

（6）高压点火线的阻燃试验：供火时间 30s，停火后应在 30s 内自熄。

（7）电线经受低温柔软性试验、耐油和耐燃料油试验后，需按表 5.5-112 规定进行耐电压试验。

（8）阻尼芯高压点火线的拉伸试验：对外径代号为 1、2、3 电线的拉力分别为 180N、250N、250N，试验后需按表 5.5-112 规定进行耐电压试验。

表 5.5-110 铜芯高压点火线的结构尺寸

电线外径代号	导体标称截面（mm^2）	导体结构根数×直径（mm）	绝缘标称厚度（mm）		护套标称厚度（mm）	成品外径（mm）
			无护套	有护套		
1	1	19×0.26	1.70	0.90	0.8	5±0.3
2	1	19×0.26	2.70	1.70	0.9	7±0.3
3	1	19×0.26	3.20	2.20	0.9	8±0.3

表 5.5-111 阻尼芯高压点火线的结构尺寸 mm

电线外径代号	阻尼芯标称直径	绝缘标称厚度		护套标称厚度	成品外径
		无护套	有护套		
1	2	1.50	0.90	0.6	5±0.3
2	2	2.50	1.50	1.0	7±0.3
3	2	3.00	2.00	1.0	8±0.3

表 5.5-112 高压点火线工频电性（有效值）试验 kV

电线外径代号	工频火花试验	浸水电压试验（5min）	30min 电压试验	连续升压试验	耐电晕试验	理化试验后耐电压考核
1	15	10	15	25	12	12
2	20	15	20	35	15	15
3	25	20	20	40	18	20

表 5.5-113 高压点火线物理性能试验温度 ℃

型 号	高温压力试验	高温卷绕试验	快速寿命试验	
			热老化	低温试验
QGV，QGXV，QGF，QGZV，QGZXV，QGZF	70±2	105±2	90±2	−10±3
QGV—105，QGZV—105	105±2	120±2	120±2	−15±3
QGXF，QGZXF	—	105±2	90±2	−10±3

2.18 机车车辆用电缆

机车车辆用电缆具有多种特点，如电缆额定电压和使用温度的规定特殊；结构方面要求导体软、绝缘薄、外径严；性能方面要求耐矿物油和燃料油、低烟无卤阻燃和耐臭氧等。另外不同试验项目最终常以通过耐电压试验来考核。多年来贯彻的 GB 12528—1990《交流额定电压 3kV 及以下铁路机车车辆用电缆》标准已不能适应车辆使用要求，天然—丁苯绝缘电缆已趋向淘汰，氯磺聚乙烯暂可保留。GB

12528的2003补充文件增加了无卤低烟交联聚烯烃绝缘电缆，但与铁道部行业标准TB/T 1484.1—2001仍有一些差异，所以机车车辆用电缆标准还有待于进一步修订。

（1）机车车辆用电缆型号、名称和规格。电缆型号、名称和规格见表5.5-114和表5.5-115。

（2）机车车辆用电缆结构。导体结构参见表5.5-116，部分产品绝缘厚度见表5.5-117～表5.5-119。

（3）小规格125℃和150℃等级绝缘电线。小规格的125℃和150℃等级电线的绝缘标称厚度及外径尺寸见表5.5-120。

（4）制造标准和用户标准的比较。为了解使用部门的观点，以下将制造标准与用户标准的差异部分作比较，见表5.5-121。

表5.5-114　机车车辆用电缆型号和名称

型　号	产　品　名　称
DCXF—70	铜芯天然—丁苯橡皮绝缘氯丁橡皮护套机车车辆用电缆
DCH—100	铜芯氯磺化聚乙烯绝缘耐矿物油和燃料油机车车辆用电缆
DCEH—100	铜芯乙丙橡胶绝缘氯磺化聚乙烯护套耐矿物油和燃料油机车车辆用电缆
WDZ—DCYJ—100	铜芯耐热100℃无卤低烟阻燃交联聚烯烃绝缘机车车辆用电缆
WDZ—DCYJ—125	铜芯耐热125℃无卤低烟阻燃交联聚烯烃绝缘机车车辆用电缆
WDZ—DCYJB—125	铜芯耐热125℃无卤低烟阻燃高强度薄壁交联聚烯烃绝缘机车车辆用电缆
WDZ—DCYJB—150	铜芯耐热150℃无卤低烟阻燃高强度薄壁交联聚烯烃绝缘机车车辆用电缆

续表

表5.5-115　机车车辆用电缆规格

型　号	额定电压（V）	芯　数	标称截面（mm^2）
DCXF—70	750 1500	1	1～300 1.5～300
DCH—100	750	1	0.5～300
DCEH—100	750 1500 3000	1	0.5～300 1～300 2.5～300
WDZ—DCYJB—125	750	1	0.5～6
WDZ—DCYJB—150	750	1	0.5～6
WDZ—DCYJ—125	250 500 750 1000 1500 3000	1	1～300 1～300 0.75～300 1.5～300 0.75～300 0.75～300

表5.5-116　机车车辆用电缆导体结构

标称截面（mm^2）	导体种类及其结构 单线根数/单线直径（mm）			导体最大电阻（Ω/km）（20℃时）					
	A类	B类	D类	A类		B类		D类	
				不镀金属	镀金属	不镀金属	镀金属	不镀金属	镀金属
0.12	7/0.15	30/0.07	—	150	163	174	183	—	—
0.3	16/0.15	77/0.07	—	69.2	71.5	68	68	—	—
0.5	16/0.20	28/0.15	19/0.18	39.0	40.1	39.0	39.0	36.0	36.7
0.75	24/0.20	42/0.15	19/0.23	26.0	26.7	26.0	26.0	24.5	24.7
1	32/0.20	56/0.15	19/0.26	19.5	20.0	19.5	19.5	19.1	18.2
1.2	—	—	19/0.28	—	—	—	—	15.6	15.2
1.5	30/0.25	85/0.15	19/0.32	13.3	13.7	13.3	13.3	12.1	12.2
2	—	—	19/0.37	—	—	—	—	9.80	9.90
2.5	50/0.25	140/0.15	19/0.41	7.98	8.21	7.98	7.98	7.41	7.56
4	56/0.30	228/0.15	19/0.52	4.95	5.09	4.95	4.95	4.61	4.70
6	84/0.30	189/0.20	19/0.64	3.30	3.39	3.30	3.30	3.08	3.11
10	80/0.40	324/0.20	—	1.91	1.95	1.91	1.91	—	—
16	126/0.40	513/0.20	—	1.21	1.24	1.21	1.21	—	—
25	196/0.40	783/0.20	—	0.780	0.795	0.780	0.780	—	—
35	276/0.40	1107/0.20	—	0.554	0.565	0.554	0.554	—	—
50	396/0.40	702/0.30	—	0.386	0.393	0.386	0.386	—	—
70	360/0.50	999/0.30	—	0.272	0.277	0.272	0.272	—	—
95	475/0.50	1332/0.30	—	0.206	0.210	0.206	0.206	—	—
120	608/0.50	1702/0.30	—	0.161	0.164	0.161	0.161	—	—
150	756/0.50	2109/0.30	—	0.129	0.132	0.129	0.129	—	—
185	925/0.50	1443/0.40	—	0.106	0.108	0.106	0.106	—	—
240	1221/0.50	1891/0.40	—	0.081 0	0.081 7	0.081 0	0.081 0	—	—
300	1525/0.50	2379/0.40	—	0.064	0.065 4	0.064	0.064	—	—

表 5.5-117　　DCH—100 电缆绝缘厚度和外径

导体标称截面 (mm^2)	绝缘标称厚度 (mm)	平均外径上限 (mm)	导体标称截面 (mm^2)	绝缘标称厚度 (mm)	平均外径上限 (mm)	导体标称截面 (mm^2)	绝缘标称厚度 (mm)	平均外径上限 (mm)
0.5	1.0	3.4	10	1.4	9.0	120	2.0	22.5
0.75	1.0	3.8	16	1.4	10.5	150	2.2	25.5
1	1.2	4.4	25	1.6	12.5	185	2.4	27.5
1.5	1.2	4.7	35	1.6	14.0	240	2.6	31.0
2.5	1.2	5.2	50	1.8	16.5	300	2.8	34.0
4	1.2	6.0	70	1.8	18.5			
6	1.2	7.4	95	2.0	20.5			

表 5.5-118　　DCEH—100 电缆绝缘和护套标称厚度及外径

导体标称截面 (mm^2)	电压等级 (kV)											
	0.75				1.5				3.0			
	绝缘 (mm)	护套 (mm)	外径 (mm)		绝缘 (mm)	护套 (mm)	外径 (mm)		绝缘 (mm)	护套 (mm)	外径 (mm)	
			下限	上限			下限	上限			下限	上限
0.5	0.6	0.6	3.2	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—
0.75	0.6	0.6	3.4	4.7	—	—	—	—	—	—	—	—
1	0.6	0.6	3.5	4.9	0.8	0.8	4.3	6.0	—	—	—	—
1.5	0.6	0.6	3.7	5.4	0.8	0.8	4.5	6.6	—	—	—	—
2.5	0.7	0.7	4.4	6.2	0.9	0.9	5.0	7.6	1.4	1.2	7.0	8.6
4	0.7	0.7	5.0	6.8	0.9	0.9	5.8	8.2	1.4	1.2	7.4	9.2
6	0.7	0.7	5.4	7.8	0.9	0.9	6.4	9.0	1.4	1.2	8.0	10.0
10	0.8	0.8	7.0	9.0	1.0	1.0	7.8	9.8	1.6	1.2	9.4	11.5
16	0.8	0.8	8.0	10.5	1.0	1.0	8.8	11.5	1.6	1.2	10.0	12.5
25	1.0	1.0	10.0	13.0	1.2	1.2	10.5	13.5	1.8	1.4	12.0	15.5
35	1.0	1.0	11.0	14.5	1.2	1.2	12.0	15.0	1.8	1.4	13.5	17.0
50	1.2	1.2	13.0	17.0	1.4	1.4	14.0	18.0	2.0	1.8	16.0	20.0
70	1.2	1.2	15.0	19.5	1.4	1.4	16.0	20.5	2.0	1.8	17.5	22.0
95	1.4	1.4	17.0	21.5	1.6	1.6	18.0	22.5	2.2	2.0	20.0	24.5
120	1.4	1.4	19.0	23.5	1.6	1.6	19.5	24.5	2.2	2.0	21.5	26.5
150	1.8	1.8	22.0	28.0	2.0	1.8	22.5	29.0	2.6	2.2	24.5	30.5
185	1.8	1.8	23.0	29.5	2.0	1.8	24.0	30.0	2.6	2.2	26.0	32.0
240	2.2	2.2	28.0	34.0	2.4	2.4	28.5	35.0	3.0	2.8	30.5	37.0
300	2.2	2.2	30.0	37.0	2.4	2.4	31.0	38.0	3.0	2.8	32.0	40.0

表 5.5-119　　WDZ—DCYJ—125 电缆绝缘标称厚度及外径

导体标称截面 (mm^2)	电压等级 (kV)											
	0.75			1			1.5			3		
	绝缘 (mm)	外径 (mm)		绝缘 (mm)	外径 (mm)		绝缘 (mm)	外径 (mm)		绝缘 (mm)	外径 (mm)	
		标称	最大		标称	最大		标称	最大		标称	最大
0.75	0.8	2.72	3.00	—	—	—	1.2	3.53	3.9	1.4	3.93	4.3
1	0.8	2.9	3.3	—	—	—	1.2	3.7	4.1	1.4	4.1	4.5
1.5	0.8	3.2	3.6	0.6	3.1	3.2	1.2	4.0	4.4	1.4	4.4	4.8
2.5	0.8	3.65	4.2	0.6	3.6	3.7	1.2	4.5	5.0	1.4	4.85	5.3
4	0.8	4.52	5.0	0.6	4.2	4.3	1.2	5.35	5.9	1.4	5.75	6.3
6	0.8	5.2	5.7	0.6	4.8	4.9	1.2	6.0	6.6	1.4	6.38	7.0
10	1.2	7.1	7.7	0.6	6.0	6.1	1.4	7.5	8.1	1.6	7.9	8.5
16	1.2	8.3	9.0	0.6	7.1	7.2	1.4	8.7	9.4	1.6	9.1	9.8
25	1.2	9.7	10.5	0.7	8.9	9.0	1.4	10.1	10.9	1.6	10.5	11.3
35	1.2	10.9	11.8	0.7	10.2	10.3	1.4	11.3	12.2	1.6	11.7	12.6
50	1.4	12.9	13.9	0.7	11.8	12.0	1.6	13.3	14.4	2	14.1	15.2
70	1.6	15.3	16.5	0.7	13.7	13.9	1.8	15.7	17.0	2	16.1	17.4
95	1.6	17.2	18.6	—	—	—	2	18.0	19.4	2.2	18.4	19.8
120	1.8	19.4	21.0	—	—	—	2.2	19.6	21.4	2.4	20.2	21.8
150	2	21.7	23.4	—	—	—	2.4	22.5	24.2	2.6	22.9	24.6
185	2	23.6	25.5	—	—	—	2.4	24.4	26.3	2.6	24.8	26.8
240	2.2	27.2	29.4	—	—	—	2.6	28.0	30.2	2.8	28.4	30.6
300	2.2	29.7	32.0	—	—	—	2.6	30.5	32.8	2.8	30.9	33.4

表 5.5-120　　小规格电缆绝缘标称厚度及外径

WDZ—DCYJ—125 500V				WDZ—DCYJB—125 750V			
导体标称截面（mm^2）	绝缘厚度（mm）	标称外径（mm）	最大外径（mm）	导体标称截面（mm^2）	绝缘厚度（mm）	标称外径（mm）	最大外径（mm）
0.5	—	—	—	0.5	0.25	—	1.50
0.75	—	—	—	0.75	0.25	—	1.75
1	0.4	2.2	2.3	1	0.25	—	1.85
1.2	—	—	—	1.2	0.25	—	2.00
1.5	0.5	2.7	2.8	1.5	0.25	—	2.15
2.0	—	—	—	2.0	0.25	—	2.45
2.5	0.5	3.1	3.2	2.5	0.25	—	2.65
4	0.5	3.8	3.9	4	0.25	—	3.29
6	—	—	—	6	0.3	—	3.85

表 5.5-121　　GB 12528.11—2003 与 TB/T1484.1—2001 部分内容比较

序　号	项　　目	GB 12528.11—2003（补充件）	TB/T1484.1—2001
1	额定电压	500V、750V、1kV、1.5kV、3kV	250V、750V、1500V、3000V
2	长期工作温度	125℃、150℃	100℃、125℃（150℃待补充）
3	敷设允许弯曲半径（用户有要求时）	电缆外径≤20mm：不小于电缆外径 3 倍 电缆外径>20mm：不小于电缆外径 5 倍	电缆外径≤10mm：不大于电缆外径 2 倍 电缆外径>10mm 而≤20mm：不大于电缆外径 4 倍 电缆外径>20mm：不大于电缆外径 6 倍
4	产品结构	全部为单绝缘结构	可以有护套、金属屏蔽
5	绝缘	分普通绝缘和薄绝缘的尺寸和材料	未规定绝缘厚度和材料
6	f 值	15%	10%
7	导体标称截面	0.5～300mm^2，并有 1.2mm^2 和 2.0mm^2	0.5～240mm^2
8	耐热性试验	无此试验要求	125℃，20 000h 后断裂伸长率≥50%
9	原始力学性能	抗张强度≥MPa：普通绝缘 9；薄绝缘 30 断裂伸长率：≥125%	抗张强度：10MPa 断裂伸长率：150%
10	老化后力学性能	抗张强度保留率：≥0.8 断裂伸长率保留率：≥0.6 断裂伸长率（最小）：100	抗张强度保留率：≥0.9 断裂伸长率保留率：≥0.8
11	烟密度	普通绝缘不低于 60%；薄绝缘不低于 80%	透光率不低于 80%
12	浸油试验	抗张强度和断裂伸长率的变化率 普通绝缘最大：−50%（矿物油） −55%（燃料油） 薄绝缘外径变化率最大：±5%	抗张强度变化率（最大）：−40% 断裂伸长率变化率（最大）：−30% 外径变化率（最大）：60%
13	低温卷绕	试验温度−40℃（普通绝缘） −60℃（薄绝缘）	−25℃
14	低温拉伸	试验温度−40℃±2℃	−25℃
15	低温冲击	无此项试验要求	−40℃
16	抗摩擦试验	薄绝缘电缆要求进行抗摩擦试验（与行标中的刮磨试验相同）	除刮磨试验外，还要求对电缆的标记进行摩擦试验
17	电晕试验	无此项要求	要求进行 83.3 天的电晕试验
18	成束电缆燃烧	无此项要求	C 类，碳化部分不超过 2.5m
19	火花试验	有要求（为例行试验）	无此项要求

2.19　航空航天电缆

航空航天电缆的基本要求是重量轻、直径小、耐温高和耐磨性好，此外应能耐燃料油、润滑油和其他化学溶剂等。当前我国航空航天电缆以国家军标 GJB 773A—2000《航空航天用含氟聚合物绝缘电线电缆通用规范》为主要体系，聚酰亚胺复合薄膜绕包绝缘已很少用。该规范适用于含氟聚合物绝缘电线电缆产品（以下简称航空电缆），主要包括聚四氟乙烯（PTFE），聚全氟乙丙烯（FEP），聚偏氟乙烯（PVDF），乙烯—四氟乙烯共聚物（ETFE），交联乙烯—四氟乙烯共聚物（XETFE），四氟乙烯—全氟烷基乙烯基醚共聚物（PFA）和其他含氟聚合物。这些聚合物可单独使用，也可以与其他材料组合使用。

（1）导体材料和结构。导体有镀锡铜线、镀银铜线、镀镍铜线、镀锡铜合金线、镀银铜合金线、镀镍铜合金线和铝

线（JL型）。镀层限制使用温度：锡为150℃，银为200℃，镍为250℃。参考GJB 1640—1993《航空航天电线电缆用导体品种级截面系列》标准，同心绞合铜导体截面、结构尺寸及20℃时直流电阻见表5.5-122，同心绞合铜合金导体截面、结构尺寸及20℃时直流电阻见表5.5-123，束绞铜导体截面、结构尺寸及20℃时直流电阻见表5.5-124，同心绞铝导体截面、结构尺寸及直流电阻见表5.5-125。截面为0.5mm² 以下铜导体的断裂伸长率应不小于6%，截面0.5mm² 及以上铜导体的断裂伸长率应不小于10%。铜合金导体和铝导体全部截面规格断裂伸长率应不小于6%。铜合金单线的抗拉强度应不小于490MPa。其电阻率不大于0.021 96 Ω·mm²/m。导体绞合节距的节径比倍数应不大于表5.5-126的规定。

表5.5-122　　同心绞合铜导体截面、结构尺寸及20℃时直流电阻

标称截面 (mm²)	计算截面 (mm²)	根数/直径 (mm)	外径 (mm)	直流电阻（Ω/km）					
				单芯电缆不大于			多芯电缆不大于		
				JX型	JY型	JN型	JX型	JY型	JN型
0.014	0.013 74	7/0.05	0.15±0.02	1454	1343	1479	1483	1369	1509
0.035	0.035 39	7/0.08	0.24±0.02	568	525	578	579	535	590
0.06	0.054 98	7/0.10	0.30±0.02	364	336	370	371	342	377
0.08	0.079 17	7/0.12	0.36±0.03	245	227	250	250	231	255
0.14	0.140 7	7/0.16	0.48±0.03	138	128	140	140	130	143
0.2	0.214 9	19/0.12	0.60±0.05	90.4	83.5	92.0	92.2	85.2	93.8
0.4	0.382 0	19/0.16)	0.80±0.05	50.8	46.9	51.7	51.8	47.9	52.8
(0.5)	(0.483 5)	(19/0.18)	0.90±0.05	38.8	37.1	40.8	39.5	37.8	41.6
0.6	0.596 9	19/0.20	1.00±0.05	32.5	30.1	33.1	33.2	30.7	33.8
(0.75)	0.789 4	19/0.23	1.15±0.05	24.6	22.7	24.2	25.1	23.2	24.8
1	1.008	19/0.26	1.30±0.08	19.3	17.8	19.1	19.7	18.1	19.4
1.2	1.170	19/0.28	1.40±0.08	16.6	15.3	16.4	16.9	15.6	16.7
(1.5)	1.528	19/0.32	1.60±0.08	12.7	11.7	12.6	12.9	12.0	12.8
2	2.043	19/0.37	1.85±0.08	9.50	8.78	9.40	9.70	8.96	9.60
(2.5)	2.615	37/0.30	2.10±0.11	7.43	6.86	7.34	7.58	7.00	7.48
3	2.976	37/0.32	2.24±0.11	6.53	6.03	6.45	6.66	6.15	6.58
(4)	3.978	37/0.37	2.59±0.11	4.88	4.51	4.83	4.98	4.60	4.92
5	4.885	37/0.43	2.87±0.11	3.98	3.67	3.93	4.05	3.75	4.01
(6)	5.885	37/0.45	3.15±0.11	3.30	3.05	3.26	3.36	3.05	3.33
8	8.190	19×7/0.28	4.20±0.23	2.37	2.19	2.34	2.42	2.23	2.39
(10)	10.70	19×7/0.32	4.80±0.23	1.82	1.68	1.80	1.85	1.71	1.83
13	12.80	19×7/0.35	5.25±0.23	1.52	1.40	1.50	1.55	1.43	1.53
(16)	15.89	19×7/0.39	5.85±0.23	1.22	1.13	1.31	1.25	1.15	1.23
20	21.15	19×7/0.45	6.75±0.23	0.918	0.848	0.910	0.937	0.865	0.918
(25)	25.15	19×16/0.32	7.52±0.35	0.795	0.734	0.758	0.810	0.748	0.800
35	35.19	19×14/0.41	9.05±0.35	0.553	0.511	0.548	0.564	0.521	0.559
	(35.14)	(133/0.58)							
40	40.14	19×16/0.41	9.60±035	0.484	0.447	0.480	0.494	0.456	0.489
50	50.17	09×20/0.41	10.57±0.35	0.387	0.358	0.384	0.395	0.365	0.391
70	66.48	19×22/0.45	12.83±0.35	0.292	0.270	0.289	0.299	0.275	0.295
	(68.60)	(189/0.68)							
95	93.68	19×31/0.45	15.07±0.45	0.207	0.192	0.205	0.212	0.195	0.210
	(49.06)	(259/0.68)							

表5.5-123　　同心绞合铜合金导体截面、结构尺寸及20℃时直流电阻

标称截面 (mm²)	计算截面 (mm²)	根数/直径 (mm)	外径 (mm)	直流电阻（Ω/km）					
				单芯电缆不大于			多芯电缆不大于		
				JHX型	JHY型	JHN型	JHX型	JHY型	JHN型
0.06	0.054 98	7/0.10	0.30±0.02	456	419	446	465	428	455
0.08	0.079 17	7/0.12	0.36±0.03	308	283	301	314	288	307
0.14	0.140 7	7/0.96	0.48±0.03	173	159	170	176	162	173
0.2	0.214 9	19/0.12	0.60±0.05	113	104	111	116	106	133
0.4	0.382 0	(19/0.16)	0.80±0.05	63.8	58.6	62.4	65.1	59.8	63.7
(0.5)	(0.483 5)	(19/0.18)	0.90±0.05	50.4	46.3	49.3	51.4	47.3	50.3
0.6	0.596 9	19/0.20	1.00±0.05	40.8	37.5	40.0	41.7	38.3	40.8

表 5.5-124　　束绞铜导体截面、结构尺寸及 20℃ 时直流电阻

标称截面 (mm^2)	计算截面 (mm^2)	根数/单线直径 (mm)	计算外径 (mm)	单芯电缆导体直流电阻 (Ω/km)	
				SY 型不大于	SX 型不大于
0.014	0.013 74	7/0.05	0.15	1343	1454
0.035	0.035 19	7/0.08	0.24	524	568
0.06	0.060 32	12/0.08	0.33	306	328
0.08	0.080 43	16/0.08	0.37	229	246
0.1	0.105 6	21/0.08	0.42	175	189
0.14	0.150 8	30/0.08	0.50	122	137
0.2	0.204 2	26/0.10	0.59	90.9	95.1
0.3	0.306 3	39/0.10	0.72	60.3	63.5
0.4	0.400 6	51/0.10	0.82	46.2	46.8

表 5.5-125　　同心绞铝导体截面、结构尺寸及 20℃ 时直流电阻

标称截面 (mm^2)	计算截面 (mm^2)	根数/单线直径 (mm)	计算外径 (mm)	单芯电缆导体直流电阻不大于 (Ω/km)
8	7.793	7×7/0.45	4.05±0.1	3.89
(10)	10.02	7×9/0.45	5.00±0.1	3.02
13	13.36	7×12/0.45	5.61±0.12	2.27
(16)	15.59	7×14/0.45	5.96±0.12	1.94
20	20.04	7×18/0.45	6.75±0.15	1.51
(25)	24.49	7×22/0.45	7.70±0.15	1.24
35	34.36	7×25/0.50	9.23±0.22	0.882
40	41.04	19×11/0.50	10.40±0.22	0.738
50	48.50	19×13/0.50	11.00±0.22	0.625
70	70.88	19×19/0.50	12.05±0.30	0.427
95	93.27	19×25/0.50	15.40±0.30	0.325

表 5.5-126　　导体绞合节距的节径比倍数

绞合方式	7根单线绞合	股线和其他束合	内层	外层
同心绞合	16	—	30	16
复合绞合	—	—	20	14
束线绞合	20	30	—	—

(2) 绝缘材料及其缩写。聚四氟乙烯 (PTFE) 挤制绝缘加有耐磨填料的聚四氟乙烯 (PTFE) 挤制绝缘 (F4)。

聚全氟乙丙烯 (FEP) 挤制绝缘 (F46)。

乙烯—四氟乙烯共聚物 (ETFE) 挤制绝缘 (F40)。

辐照交联乙烯—四氟乙烯共聚物 (XETFE) 挤制绝缘 (F40J)。

乙烯—三氟氯乙烯共聚物 (ECTFE) 挤制绝缘 (F30)。

聚四氟乙烯薄膜 (车削薄膜) 绕包绝缘 (F42)。

聚四氟乙烯生料带绕包绝缘 (F43)。

聚四氟乙烯带/玻璃丝涂聚四氟乙烯乳液/聚四氟乙烯生料带组合绝缘 (F44)。

聚全氟乙丙烯(FEP)/聚偏氟乙烯(PVDF)组合绝缘 (F45)。

聚四氟乙烯/聚酰亚胺/聚四氟乙烯 (PTFE/PI/PTFE) 复合带和聚四氟乙烯生料带组合绝缘 (F47)。

以上各种含氟聚合物的性能要求见表 5.5-127～表 5.5-134。

(3) 屏蔽材料和结构。屏蔽材料有镀锡圆铜线、镀锡扁铜线、镀银圆铜线、镀银扁铜线、镀镍圆铜线、镀镍扁铜线、镀银圆铜合金线、镀银扁铜合金线、镀镍圆铜合金线和镀镍扁铜合金线等。屏蔽结构有圆导体编织或扁导体编织，圆导体紧密缠绕或扁导体紧密缠绕。屏蔽用扁铜线的厚度为 0.040mm±0.010mm，宽度应按详细规范的规定选用。屏蔽编织密度应不小于 85%，或者不小于 90%。除缆芯外径大于 7.9mm，编织角应不小于 50°，不大于 72°。编织铜线接头处应修剪整齐，屏蔽层应具有连续性。

表 5.5-127　　聚四氟乙烯树脂性能表

序号	性能项目	单位	PTFE 树脂技术要求
1	抗张强度 (23℃)	MPa	≥24
2	断裂伸长率	%	≥200①
3	熔点 (DSC 法)	℃	320～335
4	介电常数 (1MHz)		1.8～2.2
5	介质损耗角正切 (1MHz)		$\leqslant 2.5\times10^{-4}$
6	体积电阻率 (23℃)	Ω·cm	$\geqslant 1\times10^{17}$
7	热老化 (313℃±3℃，120h)		≥0.5
8	压缩比		≥500

① 无机填料增强的耐磨 PTFE 最小平均伸长率不小于 100%。

表 5.5-128　　聚四氟乙烯生料带性能表

序号	性能项目	单位	PTFE 生料带技术要求
1	厚度公差	%	≤±10%
2	抗张强度	MPa	
	纵向		≥10
	横向		≥1
3	断裂伸长率	%	
	纵向		≥80
	横向		≥350
4	介电强度	kV/mm	≥30
5	比挥发度	%	≤0.5

表 5.5-129　　聚全氟乙丙烯树脂的技术指标

序号	性能项目	单位	FEP 树脂技术要求	
			FEP460	FEP461
1	熔体流动速率	g/min	0.41～1.0	0.21～0.40
2	抗张强度 (23℃)	MPa	≥21	≥25
3	断裂伸长率	%	≥300	≥300
4	熔点 (DSC 法)	℃	255～266	255～266
5	介电常数 (1MHz)		2.0～2.2	2.0～2.2
6	介质损耗角正切 (1MHz)		$\leqslant 7\times0^{-4}$	$\leqslant 7\times10^{-4}$
7	体积电阻率 (23℃)	Ω·cm	$\geqslant 1\times10^{16}$	$\geqslant 1\times10^{16}$
8	比挥发度	%	≤0.1	≤0.1
9	耐应力开裂 (弯条法)		—	10 根试样全不开裂

表 5.5-130　　PVDF、ETFE 和 PFA 树脂的技术指标

序号	性能项目	单位	技术指标		
			PVDF 树脂	ETFE 树脂	PFA 树脂
1	熔体流动速率	g/min	—	0.2～1.0	0.2～1.3
2	抗张强度 (23℃)	MPa	≥35	≥35	≥25
3	断裂伸长率	%	≥250	≥300	≥300
4	熔点 (DSC 法)	℃	160～190	245～275	302～310
5	介电常数 (1MHz)		≤7	2.3～2.7	2.0～2.2
6	介质损耗角正切 (1MHz)		≤0.17	$\leqslant 7\times10^{-4}$	$\leqslant 5\times10^{-4}$
7	体积电阻率 (23℃)	Ω·cm	$\geqslant 1\times10^{14}$	$\geqslant 1\times10^{16}$	$\geqslant 1\times10^{16}$

表 5.5-131 聚四氟乙烯薄膜的技术指标

序号	性能项目	单位	PTFE薄膜技术要求
1	厚度公差	%	≤±10
2	抗张强度（23℃）	MPa	≥28
3	断裂伸长率	%	≥200
4	介电常数（1MHz）		1.8～2.2
5	介质损耗角正切（1MHz）		$\leqslant 2.5\times10^{-4}$
6	介电强度	kV/mm	≥60
7	体积电阻率（23℃）	Ω·cm	$\geqslant 1\times10^{16}$

表 5.5-132 聚四氟乙烯乳液的技术指标

序号	性能项目	单位	PTFE乳液技术要求	
			Ⅰ型	Ⅱ型
1	外观与机械杂质		颜色为乳白色，乳液中应无机械杂质	颜色为乳白色，乳液中应无机械杂质
2	黏度（23℃）	MPa·s	7～15	5～10
3	固体含量	%	≥60	≥25
4	分散剂含量	%	≤3	0
5	比重（23℃）		1.51～1.53	≥1.16
6	pH值		9～10	3～6
7	抗张强度	MPa	≥25.5	≥25.5
8	伸长率	%	≥300	≥300
9	初级粒子平均粒径	μm	≤0.2	≤0.2
10	体积电阻率（23℃）	Ω·cm	$\geqslant 1\times10^{17}$	$\geqslant 1\times10^{17}$
11	介电强度	kV/mm	≥80	≥80

表 5.5-133 XETFE和XPVDF交联材料的技术指标

序号	性能项目	单位	交联材料技术指标	
			XETFE	XPVDF
1	抗张强度（23℃）	MPa	≥35	≥28
2	断裂伸长率	%	≥50	≥200
3	介电常数（1kHz）		2.5～2.7	≤7
4	介质损耗角正切（1kHz）		$\leqslant 1\times10^{-3}$	$\leqslant 3\times10^{-1}$
5	体积电阻率（23℃）	Ω·cm	$\geqslant 1\times10^{15}$	$\geqslant 1\times10^{13}$

表 5.5-134 PI/FEP和PTFE/PI/PTFE复合带的技术指标

序号	性能项目	单位	复合带技术指标	
			PI/FEP	PTFE/PI/PTFE
1	厚度公差	%	≤±10	≤±10
2	抗张强度（23℃）	MPa	≥90	≥80
3	断裂伸长率	%	≥40	≥40
4	介电常数（1kHz）		2～3	2～3
5	介质损耗角正切（1kHz）		$\leqslant 1\times10^{-3}$	$\leqslant 1\times10^{-3}$
6	介电强度	kV/mm	≥120	≥120
7	体积电阻率（23℃）	Ω·cm	$\geqslant 1\times10^{15}$	$\geqslant 1\times10^{15}$

（4）护套材料和结构。缆芯护层可采用挤制FEP护套或PVDF护套或ETFE护套，同心度应不小于70%。采用PTFE生料带绕包护层绕包搭盖率应不小于25%，包覆后经高温烧结。采用挤制PTFE护套或PFA护套，同心度应不小于70%。采用玻璃丝编织浸涂PTFE乳液的组合护层，编织密度应不小于98%。缆芯外径6mm以下的浸涂PTFE乳液，6mm及以上的绕包1～2层PTFE生料带或挤包PFA。浸涂PTFE乳液或绕包PTFE生料带后应经高温烧结。玻璃丝编织层中PTFE含量应不小于15%。采用PI/FEP复合带绕包护层绕包搭盖率应不小于30%，包覆后外涂FEP乳液或PI清漆并经高温熔封。护套厚度应符合详细规范的规定。

（5）镀银铜芯交联乙烯—四氟乙烯共聚物绝缘电线电缆。从发展历史来看，最初的橡皮绝缘面纱编织蜡克线在20世纪50年代被淘汰，聚氯乙烯绝缘尼龙护套线在20世纪80年代被淘汰，此后各种氟塑料绝缘为航空电缆主流品种，F4和F46曾经占统治地位。而后进一步的发展，是镀银铜芯交联乙烯—四氟乙烯共聚物绝缘电线电缆，包括普通型和轻型2个系列，该产品型号和名称见表5.5-135，部分产品尺寸见表5.5-136～表5.5-138。其他氟塑料绝缘品种可详细查阅GJB 773A—2000标准。

1）额定电压：交流600V。

2）额定温度：200℃。

3）最低使用环境温度：−65℃。

表 5.5-135 镀银铜芯交联乙烯—四氟乙烯共聚物绝缘电线电缆型号和名称

型号	名称	导体标称截面
FF40J—2	镀银铜芯XETFE绝缘电线电缆	标准型：1芯电缆为0.14～70mm²，2,3,4芯电缆为0.14～2mm²
FF40JP21—2	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线编织屏蔽PFA护套电线电缆	
FF40JH11—2	镀银铜芯XETFE绝缘XETFE护套电线电缆	
FF40JP21H11—2	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线编织屏蔽XETFE护套电线电缆	
FF40JP23H11—2	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线绕包屏蔽XETFE护套电线电缆	
FF40JH9—2	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线PFA护套电线电缆	
FF40JP21H9—2	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线编织屏蔽PFA护套电线电缆	
FF40JP23H902	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线绕包屏蔽PFA护套电线电缆	
FF40J—2Q	镀银铜芯XETFE绝缘轻型电线电缆	轻型：1芯电缆为0.08～3mm²，2,3,4芯电缆为0.08～0.75mm²
FF40JP21—2Q	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线编织屏蔽PFA护套轻型电线电缆	
FF40JH11—2Q	镀银铜芯XETFE绝缘XETFE护套轻型电线电缆	
FF40JP21H11—2Q	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线编织屏蔽XETFE护套轻型电线电缆	
FF40JP23H11—2Q	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线绕包屏蔽XETFE护套轻型电线电缆	
FF40JH9—2Q	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线PFA护套轻型电线电缆	
FF40JP21H9—2Q	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线编织屏蔽PFA护套轻型电线电缆	
FF40JP23H902Q	镀银铜芯XETFE绝缘镀锡圆铜线绕包屏蔽PFA护套轻型电线电缆	

表 5.5-136　　**无护套电线成品外径**

导体标称截面 (mm^2)	标准型电线外径 (mm)	轻型电线外径 (mm)	导体标称截面 (mm^2)	标准型电线外径 (mm)	轻型电线外径 (mm)
0.06	—	0.61±0.05	(4)	3.21±0.11	—
0.08	—	0.69±0.05	5	3.40±0.11	—
0.14	1.02±0.05	0.81±0.05	(6)	3.97±0.15	—
0.2	1.14±0.05	0.94±0.05	8	4.95±0.20	—
0.4/0.3	1.27±0.05	1.09±0.05	(10)	5.66±0.20	—
0.6/0.5	1.47±0.05	1.27±0.05	13	6.12±0.25	—
(0.75)	1.71±0.05	1.45±0.05	(16)	7.15±0.25	—
1	1.78±0.08	1.52±0.05	20	7.87±0.25	—
1.2	1.96±0.08	1.73±0.05	(25)	9.32±0.41	—
(1.5)	2.22±0.08	1.96±0.08	35	10.95±0.41	—
2	2.39±0.08	2.16±0.08	40	11.50±0.41	—
(2.5)	2.72±0.08	2.54±0.08	50	12.47±0.41	—
3	2.82±0.08	2.62±0.08	70	15.15±0.41	—

表 5.5-137　　**部分镀银铜线 F40J 绝缘轻型电缆结构尺寸**

芯数	导体标称截面 (mm^2)	护层厚度				成品电缆外径最大值 (mm)				
		H11型		H10、H3型		FF40J P21—2Q	FF40J P21H11—2Q	FF40J P21H10—2Q FF40J P21H3—2Q	FF40J P23H11—2Q	FF40J P23H10—2Q FF40J P23H3—2Q
		最大	最小	最大	最小					
1芯	0.06	0.25	0.13	0.38	0.18	1.11	1.63	1.83	1.40	1.60
	0.08	0.25	0.13	0.38	0.18	1.19	1.71	1.91	1.48	1.68
	0.14	0.25	0.13	0.38	0.18	1.31	1.83	2.03	1.60	1.80
	0.2	0.25	0.13	0.38	0.18	1.44	1.96	2.16	1.73	1.93
	0.4/0.3	0.25	0.13	0.38	0.18	1.59	2.11	2.31	1.88	2.08
	0.6/0.5	0.25	0.13	0.38	0.18	1.77	2.29	2.49	2.06	2.26
	(0.75)	0.25	0.13	0.38	0.18	1.95	2.47	2.67	2.24	2.44
	1	0.25	0.13	0.38	0.18	2.02	2.54	2.74	2.31	2.51
	1.2	0.25	0.13	0.38	0.18	2.23	2.75	2.95	2.52	2.72
	(1.5)	0.25	0.13	0.38	0.18	2.49	3.01	3.21	2.78	2.98
	2	0.25	0.13	0.38	0.18	2.69	3.21	3.41	2.98	3.18
	(2.5)	0.25	0.13	0.38	0.18	3.07	3.59	3.79	3.36	3.56
	3	0.25	0.13	0.38	0.18	3.15	3.67	3.87	3.44	3.64
2芯	0.06	0.25	0.13	0.38	0.18	1.77	2.29	2.49	2.06	2.26
	0.08	0.25	0.13	0.38	0.18	1.93	2.45	2.65	2.22	2.42
	0.14	0.25	0.13	0.38	0.18	2.17	2.69	2.89	2.46	2.66
	0.2	0.25	0.13	0.38	0.18	2.43	2.95	3.15	2.72	2.92
	0.4/0.3	0.25	0.13	0.38	0.18	2.73	3.25	3.45	3.02	3.22
	0.6/0.5	0.25	0.13	0.38	0.18	3.09	3.61	3.81	3.38	3.58
	(0.75)	0.25	0.13	0.38	0.18	3.45	3.97	4.17	3.74	3.94
3芯	0.06	0.25	0.13	0.38	0.18	1.88	2.40	2.60	2.17	2.37
	0.08	0.25	0.13	0.38	0.18	2.05	2.57	2.77	2.34	2.54
	0.14	0.25	0.13	0.38	0.18	2.31	2.83	3.03	2.60	2.80
	0.2	0.25	0.13	0.38	0.18	2.59	3.11	3.31	2.88	3.08
	0.4/0.3	0.25	0.13	0.38	0.18	2.91	3.43	3.63	3.40	3.40
	0.6/0.5	0.25	0.13	0.38	0.18	3.30	3.82	4.02	3.59	3.79
	(0.75)	0.25	0.13	0.38	0.18	3.69	4.21	4.41	3.98	4.18
4芯	0.06	0.25	0.13	0.38	0.18	2.05	2.57	2.77	2.34	2.54
	0.08	0.25	0.13	0.38	0.18	2.24	2.76	2.96	2.53	2.73
	0.14	0.25	0.13	0.38	0.18	2.53	3.05	3.25	2.82	3.02
	0.2	0.25	0.13	0.38	0.18	2.85	3.37	3.57	3.14	3.34
	0.4/0.3	0.25	0.13	0.38	0.18	3.21	3.73	3.93	3.50	3.70
	0.6/0.5	0.25	0.13	0.38	0.18	3.64	4.16	4.36	3.93	4.13
	(0.75)	0.28	0.15	0.51	0.25	4.08	4.65	5.10	4.45	4.87

注　所有型号的屏蔽层单线直径为 0.10mm。

表 5.5-138 部分镀银铜线 F40J 绝缘标准型电缆结构尺寸

芯数	导体标称截面（mm^2）	护层厚度				成品电缆外径最大值（mm）				
		H11 型		H9 型		FF40J P21—2	FF40J P21H11—2	FF40J P21H9—2	FF40J P23H11—2	FF40J P23H9—2
		最大	最小	最大	最小					
1 芯	0.14	0.25	0.13	0.38	0.18	1.52	2.04	2.24	1.81	2.01
	0.2	0.25	0.13	0.38	0.18	1.64	2.16	2.36	1.93	2.13
	0.4/0.3	0.25	0.13	0.38	0.18	1.77	2.29	2.49	2.06	2.26
	0.6/0.5	0.25	0.13	0.38	0.18	1.97	2.49	2.69	2.26	2.46
	(0.75)	0.25	0.13	0.38	0.18	2.21	2.73	2.93	2.50	2.70
	1	0.25	0.13	0.38	0.18	2.31	2.83	3.03	2.63	2.80
	1.2	0.25	0.13	0.38	0.18	2.49	3.01	3.21	2.78	2.98
	(1.5)	0.25	0.13	0.38	0.18	2.75	3.27	3.47	3.04	3.24
	2	0.25	0.13	0.38	0.18	2.92	3.44	3.64	3.21	3.41
	(2.5)	0.25	0.13	0.38	0.18	3.25	3.77	3.97	3.54	3.74
	3	0.25	0.13	0.38	0.18	3.35	3.87	4.07	3.64	3.84
	(4)	0.25	0.13	0.38	0.18	3.78	4.30	4.50	4.07	4.27
	5	0.28	0.15	0.51	0.25	3.96	4.56	4.98	4.33	4.75
	(6)	0.28	0.15	0.51	0.25	4.57	5.13	5.59	4.90	5.36
2 芯	0.14	0.25	0.13	0.38	0.18	2.59	3.11	3.31	2.88	3.08
	0.2	0.25	0.13	0.38	0.18	2.83	3.35	3.55	3.12	3.32
	0.4/0.3	0.25	0.13	0.38	0.18	3.09	3.61	3.81	3.38	3.58
	0.6/0.5	0.25	0.13	0.38	0.18	3.49	4.01	4.21	3.78	3.98
	(0.75)	0.28	0.15	0.51	0.25	3.97	4.57	4.99	4.34	4.76
	1	0.28	0.15	0.51	0.25	4.17	4.77	5.19	4.54	4.96
	1.2	0.28	0.15	0.51	0.25	4.53	5.13	5.55	4.90	5.32
	(1.5)	0.28	0.15	0.51	0.25	5.05	5.65	6.07	5.42	5.84
	2	0.30	0.18	0.51	0.25	5.39	6.11	6.41	5.88	6.18
3 芯	0.14	0.25	0.13	0.38	0.18	2.76	3.28	3.48	3.05	3.25
	0.2	0.25	0.13	0.38	0.18	3.02	3.54	3.74	3.31	3.51
	0.4/0.3	0.25	0.13	0.38	0.18	3.30	3.82	4.02	3.59	3.79
	0.6/0.5	0.25	0.13	0.38	0.18	3.73	4.25	4.45	4.03	4.22
	(0.75)	0.28	0.15	0.51	0.25	4.25	4.85	5.27	4.62	5.04
	1	0.28	0.15	0.51	0.25	4.47	5.07	5.49	4.84	5.26
	1.2	0.28	0.15	0.51	0.25	4.86	5.46	5.88	5.23	5.65
	(1.5)	0.30	0.18	0.51	0.25	5.42	6.14	6.44	5.91	6.21
	2	0.30	0.18	0.51	0.25	5.79	6.51	6.81	6.28	6.58
4 芯	0.14	0.25	0.13	0.38	0.18	3.04	3.56	3.76	3.34	3.54
	0.2	0.25	0.13	0.38	0.18	3.33	3.85	4.05	3.62	3.82
	0.4/0.3	0.25	0.13	0.38	0.18	3.64	4.16	4.36	3.92	4.13
	0.6/0.5	0.28	0.15	0.51	0.25	4.13	4.73	5.15	4.50	4.92
	(0.75)	0.28	0.15	0.51	0.25	4.71	5.31	5.73	5.08	5.50
	1	0.28	0.15	0.51	0.25	4.95	5.55	5.97	5.32	5.74
	1.2	0.30	0.18	0.51	0.25	5.39	6.11	6.41	5.88	6.18
	(1.5)	0.30	0.18	0.51	0.25	6.02	6.74	7.04	6.51	6.81
	2	0.33	0.18	0.51	0.25	6.43	7.15	7.45	6.92	7.22

注 所有型号的屏蔽层单线直径为 0.10mm。

（6）航空航天电线电缆的鉴定试验。航空航天电线电缆采用了美国军用标准（MIL）。对于试验性质引用了《鉴定试验》术语，实际上其内容包括习惯引用的例行试验、抽样试验和型式试验的全部项目。GJB 773A—2000 标准除总则外，还有 20 多个单篇规范，也就是产品标准。进行试验时需要将总则和单篇规范结合一起使用，因为同一试验项目，其试验条件应按单篇规范来确定，表 5.5-139 仅罗列了试验项目名称，详细规定可查阅 GJB 773A—2000 标准。

表 5.5-139　　航空航天电线电缆试验项目简略汇总表

序　号	项　目　名　称	简　　要　　说　　明
1	电线及电缆材料检验	导体、绝缘、屏蔽和护套材料应符合 GJB 773A 的相应规定
2	电线及电缆结构尺寸	导体结构、导体外径、绝缘结构、绝缘最薄处厚度、护套结构、护套最薄处厚度、绝缘和护套的同心度、屏蔽结构、编织屏蔽的编织角度和编织密度、电线及电缆外径，应符合 GJB 773A 总则及其单篇规范的相应规定
3	电气性能	电线导体电阻应符合 GJB 773A 总则及其单篇规范的相应规定
		电线绝缘电阻和电线绝缘表面电阻应符合 GJB 773A 总则及其单篇规范的相应规定
		电线及电缆耐电压： (1) 绝缘火花电压、绝缘浸水电压、绝缘脉冲电压应符合 GJB 773A 单篇规范规定 (2) 导体对屏蔽、芯线对芯线、屏蔽护套及多芯电缆应符合 GJB 773A 单篇规范规定
4	机械物理性能	电线导体力学性能及其可焊性、绝缘及护套可剥性应符合 GJB 773A 的相应规定
5	电线及电缆老化	按规定温度和时间试验后卷绕，绝缘应不开裂并浸水电压试验应不击穿，护套试验后卷绕应不开裂，但不要求退绕检查
6	绝缘及护套交联度验证	按规定温度和时间试验后卷绕，绝缘和护套应不开裂，浸水电压试验应不击穿
7	电线及电缆浸液	电线绝缘和 H11 型护套，按规定浸液试验后外径变化率应不大于 5%，不开裂，浸水电压试验应不击穿
8	电线耐推进剂	电线绝缘按规定浸推剂进试验后，外径变化率不大于 5%，浸水电压试验不击穿
9	电线及电缆粘连	电线及电缆按规定试验后不粘连
10	电线绝缘收缩	应符合 GJB 773A 各单篇规范的相应规定
11	电线绝缘收缩	应符合 GJB 773A 各单篇规范的相应规定
12	电线潮湿	应符合 GJB 773A 各单篇规范的相应规定
13	电线及电缆高温卷绕	按规定温度试验后，卷绕应不开裂
14	电线及电缆低温卷绕	按规定温度卷绕后应不开裂，浸水电压试验应不击穿
15	电线及电缆燃烧	应符合 GJB 773A 相关单篇规范的规定
16	电线冒烟	在规定温度下，如 250℃±5℃ 经历 15min，无冒烟现象
17	电线绝缘浸液吸收	不考核重量增加，染色液浸进距离不应超过单篇规范的规定
18	绝缘及护套抗张强度	应符合 GJB 773A 相关单篇规范的规定
19	绝缘及护套断裂伸长率	应符合 GJB 773A 相关单篇规范的规定
20	电线及电缆外观	应符合 GJB 773A 总则的规定
21	绝缘线芯颜色识别标志	应符合 GJB 773A 总则的规定
22	绝缘线芯数字识别标志	应符合 GJB 773A 总则的规定
23	电线电缆标志及字带牢度	应符合 GJB 773A 相关单篇规范的规定
24	成品电线及电缆交货长度	应符合 GJB 773A 相关单篇规范的规定
25	成品电线及电缆重量	应符合 GJB 773A 相关单篇规范的规定

注　1. 采用双层同时挤出工艺时不考核内层火花电压。

2. 电线绝缘耐电压可采用浸水电压试验，也可采用脉冲电压试验。

2.20　船用电缆

船用电缆可以认为是一个独立的产品体系，将其归属与电气装备用电线电缆并不合理。即使不包括军用船舶和特种船舶的情况，当前的 GB、GB/T、JB 和 JB/T 产品标准是 10 年前编订的，有的已不适用，为了便于读者查阅，仍收编这些标准名称及其标准号如下：

GB 9331.1—1988《额定电压 0.6/1kV 及以下船用电力电缆和电线一般规定》

GB/T 9332.1—1988《船用控制电缆一般规定》

GB/T 9333.1—1988《船用对称式通信电缆一般规定》

GB/T 9334.1—1988《船用射频电缆一般规定》

GB/T 17755—1999《额定电压 6kV、10kV 及 15kV 挤包绝缘单芯和三芯船用电力电缆》

JB 8140.1—1995《额定电压 0.6/1kV 及以下船用电力电缆和电线乙丙绝缘船用电力电缆 DA 型》

JB 8140.2—1995《额定电压 0.6/1kV 及以下船用电力电缆和电线聚氯乙烯绝缘和护套船用电力电缆，DA 型》

JB 8140.3—1995《额定电压 0.6/1kV 及以下船用电力电缆和电线天然丁苯橡皮绝缘船用电力电缆》

JB 8140.4—1995《额定电压 0.6/1kV 及以下船用电力电缆和电线交联聚乙烯绝缘船用电力电缆，DA 型》

JB/T 8141.1—1995《船用控制电缆乙丙绝缘船用控制电缆，DA 型》

JB/T 8141.2—1995《船用控制电缆聚氯乙烯绝缘和护套船用控制电缆，DA 型》

JB/T 8141.3—1995《船用控制电缆天然丁苯绝缘船用控制电缆》

JB/T 8141.4—1995《船用控制电缆交联聚乙烯绝缘船用控制电缆，DA 型》

JB/T 8142.1—1995《船用对称式通信电缆乙丙绝缘船用通信电缆，DA 型》

JB/T 8142.2—1995《船用对称式通信电缆聚氯乙烯绝缘船用通信电缆，DA 型》

JB/T 8143.1—1995《船用射频电缆额定阻抗 50Ω 铜导体实芯聚乙烯绝缘同轴射频电缆》

JB/T 8143.2—1995《船用射频电缆额定阻抗 50Ω 铜导体实芯聚四氟乙烯绝缘同轴射频电缆》

JB/T 8143.3—1995《船用射频电缆额定阻抗 75Ω 铜导体实芯聚乙烯绝缘同轴射频电缆》

JB/T 8143.4—1995《船用射频电缆额定阻抗 75Ω 铜包钢导体实芯聚四氟乙烯绝缘同轴射频电缆》

当前 GB/T 13029.1—2003 等同采用了 IEC 60092—352：1997，并作了编辑性修改。该标准取消了丁苯－天然橡皮绝缘品种。船用电缆所处环境较为严酷，自然环境温度最高可超过＋45℃，一般低温考虑为－30℃，极端可达－50℃。此外有高湿、盐雾、暴晒等。敷设的密集性、严格的阻燃性、机械振动和动态微弯，也是船舶船用电缆的共同特点。当前国内民用船舶用电缆原则上等同采用 IEC 标准。军用船舶用原则上等同采用美国军用标准。

50 年前我国船用电缆的技术落后，电缆使用寿命很短，有的甚至在船舶还没有建造完成前，发现电缆已致命的损坏，分析其原因，既不是安装和施工问题，也不是电缆制造的质量问题。其真正的原因是当时的国产电缆品种中实际上没有能适合船舶的使用条件。通过现场调研，发现了以下几个具体实例：

（1）机舱内的橡皮绝缘裸铅套电缆，安装完成后外表正常，可是待柴油机试车不久，铅套大批开裂，油雾渗入导致橡皮溶软膨胀，判电缆损坏。

（2）甲板上的橡皮护套电缆敷设后时间不长，按规定敷设的电缆弯曲处护套开裂，绝缘显露，判电缆损坏。

（3）大部分钢丝编织的电缆不同程度地出现锈蚀，判断钢丝镀锌层差和防锈漆不牢固，影响使用寿命。

（4）油浸纸绝缘铅套钢带铠装麻披电缆运行后下端严重漏油，分析属于产品设计本质缺陷，污染工作环境。

叙述以上这些问题，表面上看似乎并不重要，但证明了船用电缆技术发展的重要性和持续性。实际上国内船用电缆的研发工作从未中断。我国已是造船大国，但并不说明所有的船用电缆都能解决，该领域的研究和发展前途宽广。根据 IEC 92—351（1983）船用电力电缆用绝缘材料标准和 IEC 92—351（1983）船用电力电缆用护套材料标准，有关材料名称、缩写和性能见表 5.5-140～表 5.5-146。

表 5.5-140　　绝缘混合物类型和缩写名称

序　号	绝缘混合物类型	缩写名称	导体最高额定温度（℃）	
			正常运行	短　路
1	热塑性塑料 以聚氯乙烯或聚乙烯和醋酸乙烯共聚物为基料	PVC/A	60	150
2	弹性体或热固性塑料 （a）以乙丙橡胶或类似物为基料（EPR 或 EPDM） （b）以化学交联聚乙烯为基 （c）以硅橡胶为基	 EPR XLPE S 95	 85 85 95	 250 250 —

表 5.5-141　　护套混合物类型和缩写名称

序　号	绝缘混合物类型	缩写名称	导体最高额定温度（℃）
1	热塑性塑料 （a）以聚氯乙烯或聚乙烯和醋酸乙烯共聚物为基料 （b）无卤材料	 ST1 ST2 SHF1	 60 85 85
2	弹性体或热固性塑料 （a）以氯丁橡胶为基料 （b）以氯磺化聚乙烯或氯化聚乙烯为基料 （c）无卤材料	 SE1 SH SHF2	 85 85 85

表 5.5-142　　绝缘混合物电气性能

序号	绝缘混合物名称	单位	EPR	XLPE	S 96	PVC/A
1	绝缘电阻常数 K_1 20℃时最小值 最高运行温度时最小值	MΩ·km	 3670 3.67	 — —	 — 2	 36.7 0.037
2	浸入 60℃水后交流电容增率 （a）第 14 天末和第 1 天末间，最大值 （b）第 14 天末和第 7 天末间，最大值	%	 15 5	 — —	 15 5	 15 5

表 5.5-143　　绝缘混合物机械性能

序号	绝缘混合物名称	单位	EPR	XLPE	S 96	PVC/A
1	未老化力学性能 抗张强度：最小值 断裂伸长率：最小值	 N/mm^2 %	 4.2 200	 12.5 200	 5.0 150	 12.5 150
2	空气老化后力学性能 烘箱温度 老化时间 抗张强度：最小值 最大变化率 断裂伸长率：最小值 最大变化率	 ℃ h N/mm^2 % % %	 135±2 168 — ±30 — ±30	 135±2 168 — ±25 — ±25	 200±2 240 4.0 — 4.0 —	 80±2 168 12.5 ±25 150 ±25
3	0.55MPa±0.02MPa 空气弹老化后力学性能 温度 时间 抗张强度（最大变化率） 断裂伸长率（最大变化率）	 ℃ h % %	 127±1 40 ±30 ±30	—	—	—

表 5.5-144　　绝缘混合物特殊性能

序号	绝缘混合物名称	单位	EPR	XLPE	S 96	PVC/A
1	高温压力试验					
	试验温度	℃				80±2
	加负荷时间：试样外径小于或等于 12.5mm	h	—	—	—	4
	试样外径大于 12.5mm	h				6
	最大允许凹入深度	%				50
2	热延伸试验					
	试验温度	℃	250±3	200±3	200±3	
	加负荷时间	min	15	15	15	—
	机械应力	N/mm^2	20	20	20	
	负荷时最大伸长率	%	175	175	175	
	永久最大伸长率	%	15	15	25	
3	抗开裂试验					
	试验温度	℃	—	—	—	150±2
	加负荷时间	h				1
	试验结果					无裂纹
4	失重试验					
	温度	℃	—	—	—	80
	时间	h				168
	最大失重	mg/cm^2				2
5	低温性能试验					
	弯曲试验：用于试样外径小于或等于 12.5mm	℃				
	温度					−15
	试验结果					不开裂
	拉伸试验：用于试样外径大于 12.5mm		—	—	—	
	温度	℃				−15
	试验结果：断裂伸长率最小值	%				20
	冲击试验					
	温度	℃				−15
	试验结果					不开裂
6	耐臭氧试验					
	臭氧浓度	ppm	250～300	—	—	—
	没有龟裂的持续试验时间	h	30			

表 5.5-145　　护套混合物机械性能

序号	绝缘混合物名称	单位	ST1	ST2	SE1	SH	SHF1	SHF2
1	未老化力学性能							
	抗张强度最小值	N/mm^2	12.5	12.5	10.0	10.0	9.0	9.0
	断裂伸长率最小值	%	150	150	300	250	125	125
2	空气老化后力学性能							
	烘箱温度	℃	100±2	100±2	100±2	100±2	100±2	120±2
	老化时间	h	168	168	168	168	168	168
	抗张强度：最小值	N/mm^2	12.5	12.5	—	—	7.0	—
	最大变化率	%	±25	±25	±30	—	±30	±30
	最小保留率	%	—	—	—	70	—	—
	断裂伸长率：最小值	%	150	150	250	—	110	—
	最大变化率	%	±25	±25	±40	—	±30	±30
	最小保留率	%	—	—	—	60	—	—
3	浸油后力学性能							
	温度	℃			100±2	100±2		100±2
	时间	h			24	24		24
	抗张强度：最大变化率	%	—	—	±40	—	—	±40
	最小保留率	%				60		—
	断裂伸长率：最大变化率	%			±40			±40
	最小保留率	%			—	60		—
4	热延伸试验							
	试验温度	℃			200±3			200±3
	加负荷时间	min	—	—	15	—	—	15
	机械应力	N/mm^2			20			20
	负荷时最大伸长率	%			175			175
	永久最大伸长率	%			15			15

表 5.5-146 护套混合物特殊性能

序号	绝缘混合物名称	单位	ST1	ST2	SE1	SH	SHF1	SHF2
1	高温压力试验 试验温度 加负荷时间 试样外径≤12.5mm 试样外径>12.5mm 最大允许凹入深度	 ℃ h h %	 80 4 6 50	 80 4 6 50	—	—	 80 4 6 50	—
2	热冲击试验 试验温度 加负荷时间 试验结果	 ℃ h	 150±2 1 无裂纹	 150±2 1 无裂纹	—	—	 150±2 1 无裂纹	—
3	失重试验 温度 时间 最大失重	 ℃ h mg/cm^2	—	 100 168 1.5	—	—	—	—
4	低温性能试验 弯曲试验：试样外径≤12.5mm 温度 试验结果 拉伸试验：试样外径>12.5mm 温度 试验结果：断裂伸长率最小值 冲击试验 温度 试验结果：绝缘和护套	 ℃ ℃ % ℃ 	 −15 不开裂 −15 20 −15 不开裂	 −15 不开裂 −15 20 −15 不开裂	—	—	 −15 不开裂 −15 20 −15 不开裂	 −15 不开裂 −15 20 −15 不开裂
5	卤酸气体含量测定	mg/g	—	—	—	—	5	5
6	透光率测定		—	—	—	—	与电缆一致	

2.21 变频电机用馈电电缆

近20年来，变频调速电机的应用在国内外发展很快，年增长率超过10%，当前在冶金、矿山、交通等方面广泛地使用，最近在家用电器中同样也开始应用。变频电机用馈电电缆是指变频电机与变频电源之间的连接电缆，其需求量有较大的增长。这一段电缆长度一般情况下并不很长，但深井油泵用变频电缆则长达数千米。变频电缆技术上有一些特殊要求，已形成一种专用系列。与一般电力电缆不同，变频馈电电缆工作时存在2个特点：①电缆绝缘应能长期承受高频脉冲电压，这是变频电源中高次谐波经多次反射而产生的，而且它的幅值与电缆长度有关。②电缆作为载体，使高频电磁波对外发射，致使对环境的污染，对邻近的信号传输和通信装置产生干扰。

(1) U_0/U 为0.6/1 kV变频电缆结构。电缆导体结构及其截面系列与一般电力电缆圆形导体相同，截面配置略有差异。电缆有3个等截面相线和3个等截面中线，6个绝缘芯应对称分布绞合成缆。一般情况的标称截面可参见表5.5-147。电缆一般采用交联聚乙烯绝缘，各芯的绝缘厚度与相同电压等级的电力电缆规定相等，需要时可适当增加相线绝缘厚度。6个绝缘芯对称排列绞合成缆，并用合适带材搭盖绕包。推荐采用铜带纵包后用氩弧焊接，然后轧纹形成可弯曲的皱纹密封性铜管。当然不排斥其他的屏蔽结构，如铜带绕包加铜线编织等。外护套为聚氯乙烯或高密度聚乙烯或无卤低烟聚烯烃等。一般情况不需要铠装。

表 5.5-147 相线和中线绝缘芯标称截面 mm^2

相 线	10	16	25	35	50	70	95	120	150
中 线	2.5	4	6	8	10	16	25	25	25
中线总和	7.5	12	18	24	30	48	75	75	75

注 中线截面可以调整，但中线截面的总和应不小于相线截面的二分之一。

(2) 变频电缆试验。交联聚乙烯绝缘变频电缆的试验项目与交联聚乙烯绝缘电力电缆相同，对于 U_0/U 为0.6/1kV变频电缆，一般不要求进行脉冲电压试验。用户有要求时才进行脉冲电压试验，试验电压峰值可采用40kV，试验方法与电力电缆相同，一般极少发生击穿。

(3) 变频电缆的接地。屏蔽层良好接地是抑制电磁波对外发射的必要条件，纵包铜带轧纹屏蔽需用专用夹具接地，夹具与轧纹铜管的接触面吻合，接地线由夹具尾端引出。

(4) 中压变频电缆。随着变频电机的功率增大，0.6/1 kV电压级已无法满足传输容量要求，6/10kV级、18/30kV级的变频电缆已相继推出，其绝缘材料、结构尺寸大致与相等电压级的电力电缆相同。

2.22 核电站用1E级电缆

核电站的设计将裂变物质禁锢在3层屏障之内。第1层屏障是燃料包壳，核燃料封装在不锈钢或锆合金包壳内。第2层屏障由冷却剂一回路和反应堆容器组成，这一回路也是密封的。除因燃料包壳破裂造成少量裂变物质进入一回路外，在这一回路中还会出现一些活化产物。这些产物来自堆内及一回路结构以及一回路本身的腐蚀而产生的固体物质，它们受对内辐射活化成为带放射性的物质，并随一回路而迁移。因此反应堆设有净化过滤装置，使活化物质不超过一定剂量。第3层屏障是安全壳，它由钢板和水泥组成，其密封要求十分严格，每昼夜向外渗漏不超过壳体容积的千分之一。同时安全壳的通风系统，都要经过严密的过滤装置才与外界连通。出入安全壳的一切电缆和管道以及其他通道，都采取了防止泄漏和直接与外界连通的措施。当突发性事故造成核泄漏时，必须及时停止核燃料继续反应，否则核扩散造成后果极为惨重，假如能及时关闭，则不会造成重大核污染事故。因此1E级电气系统的重要性就在于及时指令和完成

停堆的全部过程。

作为 1E 级电缆必须按 1E 安全级的定义来考核，当前核电设计院确立的定义为：完成反应堆紧急停堆；安全壳隔离、堆芯应急冷却、反应堆余热导出、反应堆安全壳的热导出；防止放射性物质向周围环境排放等功能的电气系统设备的安全级。根据安全等级和电缆敷设场合，我国核电站用电缆分为 1E 级 K3 类、K2 类和 1E 级 K1 类。实际上 K3 类用量最多，K1 类用量不很多，K2 类基本上属于其他设备配套使用的电线电缆。按用途来说，。这些品种实际上与火力发电厂用电缆基本相同，当前可归纳如下：低压方面（1000V 及以下）有电力电缆、控制电缆、仪表电缆（包括数字传输）、热偶电缆（也称补偿电缆）和特种电线；中压方面主要是 6/10kV 电力电缆；此外一部分为对称型通信电缆和同轴型通信电缆。K3 类电缆是指敷设在安全壳外的电缆，应在正常情况和地震荷载下能执行其规定功能。K1 类电缆敷设在安全壳内，所以除了与 K3 类电缆有基本相同要求外，还必须具有耐辐射损害的能力，所以 K1 类电缆需要增加一些特殊试验项目。另外必须指出，K1 类电缆不包括核反应容器内部和顶堆的电缆。

（1）核电站用 1E 电缆的结构要点。电缆导体与普通电力电缆和控制电缆等相同，后者应采用第 2 种结构。低压电力电缆、控制电缆、仪表电缆、热偶电缆的绝缘应采用无卤低烟阻燃交联聚烯烃或无卤低烟阻燃乙丙橡胶。允许采用双层绝缘，内层为非阻燃交联聚乙烯，外层为无卤低烟热塑型聚烯烃，双层绝缘的总厚度与单层绝缘厚度规定相等，但每层厚度不作规定。双层绝缘的绝缘电阻较高，但并不是理想的结构，如果单层绝缘能符合性能要求，尽量不要采用双层绝缘。中压电力电缆绝缘和一般电力相同。通信电缆绝缘除个别另有规定外，大部分也与一般通信电缆相同。控制电缆和仪表电缆的总屏蔽基本上都用铜线编织，内部的线对或线组的单元屏蔽基本上用铝塑薄膜结构。电缆的护套大部分为热塑型无卤低烟阻聚烯烃，用户有要求时，一部分采用交联型无卤低烟阻聚烯烃。铠装电缆使用数量不多，一般均为双钢带和单层细钢丝开状。根据敷设条件的需要，铠装的外护套应采用热塑型或交联型无卤低烟阻聚烯烃。

（2）核电站用 1E 电缆需注意的试验项目。以下试验项目只是目前国内规定的情况，今后可能会增加或取消。

1）1E 级 K3 类电缆绝缘的热寿命评定试验，通常应用阿累尼乌斯方法进行试验和寿命推算。对于长期工作温度为 90℃等级的绝缘材料，要求其推算寿命超过 40 年，最好超过 60 年。

2）1E 级 K3 类电缆的单根电缆和单根绝缘线芯垂直燃烧试验，其后者是指从电缆成品上剥取的绝缘线芯进行垂直燃烧试验，这项试验对于小规格的控制电缆和仪表电缆尤为严酷。这一条款来自 IEEE 383—1974 标准的 2.5.6 条款，显而易见，这是针对聚氯乙烯绝缘的考核。分析 IEEE Std 383™—2003 标准第 8 章的标题为《燃烧试验合格证》，该条款首先规定电缆的阻燃性应按 IEEE Std 1202—1991 或 NFPA262—2002 要求进行试验，配电箱用电缆、同轴电缆、2 芯和 3 芯对称绞合电缆最低要求应通过 UL VW—1 燃烧试验，但是条款中没有提及从电缆上取下的单根绝缘线芯，是否取消了剥去护套的单根绝缘线芯通过垂直燃烧试验，需要进一步考证，国内至今仍要求单根绝缘线芯按 GB/T 标准试验。

3）1E 级 K1 类电缆的热老化试验，美国为 138℃300h，相当于使用 40 年。

4）1E 级 K1 类电缆辐照试验，电缆老化试验后用钴源进行 γ 射线辐照试验，美国对缓和环境电缆的吸收剂量规定为 7×10^5Gy，对严酷环境为 15×10^5Gy 。

5）1E 级 K1 类电缆模拟 LOCA—HELB 试验，电缆放在容器内以规定的温度、蒸汽压力和时间进行循环试验，同时喷射化学溶液，常采用含 1.5% 硼酸溶液，并在室温下用氢氧化钠调节其 pH 值至 10.5 作为溶液。喷射流量对水平投影面为 34.2[L/(min·m²)]。

6）1E 级 K1 类电缆浸水耐电压试验，电缆经 γ 辐照试验后，对缓和环境电缆，卷绕在 20 倍电缆外径的金属圆柱体上，对严酷环境电缆则为卷绕在 40 倍电缆外径的金属圆柱体上，然后浸入室温水中，以 3.15MV/m 梯度施加电压，5min 不击穿为合格。

以上仅是核电站用电缆试验的概略说明，实际试验还有许多具体细则。目前我国各核电站的采购规范不完全一致，现正在编订 1E 级电缆的通用规范，将来会得出统一的尺度。

2.23　直流高压小电流（包括瞬间脉冲大电流）软电缆

直流高压小电缆使用时的直流电压或脉冲电压峰值较高，但直流电流很小，或者只是单向瞬间脉冲电流较大。软电缆主要指仪器用直流或脉动直流高压电缆，为医疗、检测和工业设备配套等，基本上不成品种系列，但结构和性能比较相似。表 5.5-148 是常用产品型号及参数，这些产品生产批量一般很小，常作特殊订货。

表 5.5-148　直流高压小电缆常用产品

品　种	型　号	电压（kV）	电流（A）
X 射线机用电缆	XZ—50	50	10（瞬时）
	XZ—75	75	
	XZ—100	100	
	XZ—150	150	
	XZ—200	200	
乳腺摄影机电缆	GZRS	40	5
中子治疗机电缆	GEE	300	
聚乙烯高压电缆	GEYV	150	10
		200	
电子枪用电缆	GZXQ	30	20
		60	30
		100	30
		150	15
电子枪用屏蔽电缆	GZXQP	30	6
电子轰击炉用电缆	GZVHG（聚氯乙烯绝缘）	30	60
	GZXHG（橡皮绝缘）	80	90
	GZYHG（聚乙烯绝缘）	40	140
高压电护用电缆	G2XL	50	35
静电发生器用电缆	GZYJ	90	1
		120	6
		150	6
真空镀膜用电缆	GZXD	30	30
橡皮绝缘高压电缆	GXZ	30	30

2.24 耐高温电缆

2.24.1 云母带绝缘电缆

云母带由大鳞片云母或粉云母用甲基苯基硅树脂粘合在两层无碱玻璃之间，经烘焙制成耐火的绝缘带材，以50%格盖度绕包在导体上，其外挤阻燃聚氯乙烯绝缘和护套，也可挤阻燃氯磺化聚乙烯，硫化后再挤阻燃聚氯乙烯护套。这种电缆能通过IEC 331燃烧试验，而价格比氧化镁电缆低，较软而容易敷设，但云母带不能过度弯曲，因此不易制造很小格的电线电缆。早期云母带绝缘电缆用途范围不广，现在则在绕包云母带的绝缘芯外再绕包玻璃丝带加强，直接可作为电力电缆和控制电缆等产品的绝缘芯，成缆后挤包高阻燃聚氯乙烯护套或无卤低烟聚烯烃护套，也可铜带纵包后经氩弧焊后轧纹，再挤包聚氯乙烯护套，性能更佳。

2.24.2 特高温电线

特高温电线电缆的工作温度在400℃以上，耐热性比四氟乙烯绝缘更好，导体采用镀镍铜、不锈钢、镍等，绝缘和护层为有机和无机材料结合所组成，使用材有耐高温玻璃丝、石英纤维和石棉等，用绕包和编织工艺并通过含硅、硼粘合剂成型。这类电缆在高温下不燃烧，也不焦化而变成导电物质，无有害物质逸出。虽然丧失了机械强度，但在静态下能保持原状和保持一定的绝缘性能，所以可满足静态或要求不高的动态工作条件。这类电缆的寿命一般以小时计算，当温度达到极限时，寿命只能以分钟计算。KE－1000型和KK－1000型电缆可在700℃下长期工作，在900～1000℃下可短时间歇工作，在1200℃下只能瞬时工作。NWW－500型电缆的材料和性能见表5.5-149。

表5.5-149 NWW—500型电缆的材料性能

线芯材料	芯数	标称截面（mm²）	绝缘电阻（MΩ·m）	弯曲半径	工作电压（V）	使用寿命（500℃时）
铜	1～7	0.5～2	500℃时>400	不小于电缆外径5倍	交流600直流1000	静态使用2年
不锈钢	2～4	2～4				
镍	1	4～6				

2.25 环保电缆的发展

电缆行业对环保电缆术语尚未明确的定义。不管交联或非交联，无卤低烟聚烯烃绝缘和护套电缆应当确认。对于含卤聚烯烃绝缘及护套电缆，也值得研讨，如果在含卤的材料，并未列入禁用的电缆料添加剂，则就不应随意加以否定。至于热塑型或交联型聚氯乙烯绝缘及护套电缆，尽管含较多的卤素，能否作为环保电缆分界线，也难定论。按目前较多的观点是：聚氯乙烯中有害金属化合物及有害含臭化合物低于有关法规的规定值，仍属于可大量应用的材料。

2.25.1 交联聚烯烃绝缘及护套电缆

交联聚烯烃绝缘电缆的额定电压U_0/U为450/750V和300/500V。电缆的长期允许工作温度分为105℃、125℃和150℃ 3级。按JB/T 10491－2004《额定电压450/750V及以下交联聚烯烃绝缘电线和电缆》标准制造。其结构尺寸与聚氯乙烯绝缘电缆差不多。电缆型号和产品名称见表5.5-150，规格见表5.5-151，绝缘和护套机械物理性能见表5.5-152和表5.5-153。XPO和SXE为交联聚烯烃绝缘和护套；单根电线电缆垂直燃烧试验应符合GB/T 18380.1或GB/T 18380.2要求。成束电线电缆阻燃试验应符合GB/T 18380.3要求。含卤和无卤产品的烟密度应符合GB/T 17651.2的要求。

表5.5-150 交联聚烯烃绝缘电缆型号和名称

型 号	产品名称（括号中数字表示耐热温度，名称相同）	备 注
Z—BYJ—105（125、150）	耐热105（125、150）℃阻燃交联聚烯烃绝缘电缆	W为无卤 Z为阻燃 105；125；150为温度等级
WDZ—BYJ—105（125、150）	耐热105（125、150）℃无卤低烟阻燃交联聚烯烃绝缘电缆	
Z—RYJ—105（125、150）	耐热105（125、150）℃阻燃交联聚烯烃绝缘软电缆	
WDZ—RYJ—105（125、150）	耐热105（125、150）℃无卤低烟阻燃交联聚烯烃绝缘软电缆	
WDZ—BYJYJ—105（125、150）	耐热105（125、150）℃无卤低烟阻燃交联聚烯烃绝缘和护套电缆	
Z—RYJYJ—105（125、150）	耐热105（125、150）℃阻燃交联聚烯烃绝缘和护套软电缆	
WDZ—RYJYJ—105（125、150）	耐热105（125、150）℃无卤低烟阻燃交联聚烯烃绝缘和护套软电缆	

表5.5-151 交联聚烯烃绝缘电缆的规格

型 号	额定电压（V）	芯数	标称截面（mm²）
Z—BYJ—105 Z—BYJ—125 Z—BYJ—150 WDZ—BYJ—105 WDZ—BYJ—125 WDZ—BYJ—150	450/750	1	0.5～240
Z—RYJ—105 Z—RYJ—125 Z—RYJ—150 WDZ—RYJ—105 WDZ—RYJ—125 WDZ—RYJ—150	450/750	1	0.5～240
WDZ—BYJYJ—105 WDZ—BYJYJ—125 WDZ—BYJYJ—150	300/500	1	0.75～10
Z—RYJYJ—105 Z—RYJYJ—125 Z—RYJYJ—150 WDZ—RYJYJ—105 WDZ—RYJYJ—125 WDZ—RYJYJ—150	300/500	2、3、4、5	0.75～2.5

2.25.2 交联聚氯乙烯绝缘及护套电缆

交联聚氯乙烯绝缘及护套电缆的额定电压U_0/U为450/750V和300/500V。电缆的长期允许工作温度分为90℃和105℃2级。按JB/T 10438—2004《额定电压450/750V及以下交联聚氯乙烯绝缘电线和电缆》标准制造，其结构尺寸与聚氯乙烯绝缘电缆差不多，该产品的材料是比较新的材料，其电缆型号和产品名称见表5.5-154，规格见表5.5-155。交联聚氯乙烯电缆的绝缘和护套材料及其机械物理性能见表5.5-156。XLPVC/XP表示交联聚烯烃绝缘；XLPVC/SX表示交联聚烯烃护套；90和105数字为温度等级。单根绝缘电线或电缆的垂直燃烧试验应符合GB/T 18380.1或GB/T 18380.2要求。成束电线或电缆的阻燃性试验应符合GB/T 18380.3规定要求。

表 5.5-152　　成品电缆交联聚烯烃绝缘机械物理性能

序号	试验项目	单位	混合物代号 XPO					
			105Z	105W	125Z	125W	150Z	150W
1	原始力学性能							
	抗张强度：最小中间值	MPa	12.5	9.0	12.5	9.0	12.5	9.0
	断裂伸长率：最小中间值	%	200	120	200	120	200	120
2	空气烘箱老化后力学性能							
	老化条件：温度	℃	135±2	135±2	158±2	158±2	180±2	180±2
	时间	h	7×24	7×24	7×24	7×24	7×24	7×24
	抗张强度：最大变化率	%	±25	±30	±25	±30	±25	±30
	断裂伸长率：最大变化率	%	±25	±30	±25	±30	±25	±30
3	热延伸试验							
	试验条件：温度	℃	200±3	200±3	200±3	200±3	200±3	200±3
	负荷时间	min	15	15	15	15	15	15
	机械压力	MPa	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	试验结果：载荷下最大伸长率	%	175	175	175	175	175	175
	冷却后最大永久变形	%	15	25	15	25	15	25
4	热收缩试验							
	试验条件：温度	℃	135±3	135±3	158±3	158±3	180±3	180±3
	时间	h	1	1	1	1	1	1
	试验结果：收缩率最大	%	4	4	4	4	4	4
5	低温卷绕试验							
	试验条件：温度	℃	−25±2	−20±2	−25±2	−20±2	−25±2	−20±2
	试验结果		不开裂	不开裂	不开裂	不开裂	不开裂	不开裂
6	低温拉伸试验							
	试验条件：温度	℃	−25±2	−20±2	−25±2	−20±2	−25±2	−20±2
	试验结果：最小伸长率	%	20	20	20	20	20	20
7	燃烧气体的腐蚀性试验							
	pH 值最小		—	4.3	—	4.3	—	4.3
	电导率最大	μS/mm	—	10	—	10	—	10

表 5.5-153　　成品电缆交联聚烯烃护套机械物理性能

序号	试验项目	单位	混合物代号 SXE					
			105Z	105W	125Z	125W	150Z	150W
1	原始力学性能							
	抗张强度：最小中间值	MPa	12.5	9.0	12.5	9.0	12.5	9.0
	断裂伸长率：最小中间值	%	250	120	250	120	250	120
2	空气烘箱老化后力学性能							
	老化条件：温度	℃	135±2	135±2	158±2	158±2	180±2	180±2
	时间	h	7×24	7×24	7×24	7×24	7×24	7×24
	抗张强度：最大变化率	%	±25	±30	±25	±30	±25	±30
	断裂伸长率：最大变化率	%	±25	±30	±25	±30	±25	±30
3	热延伸试验							
	试验条件：温度	℃	200±3	200±3	200±3	200±3	200±3	200±3
	载荷时间	min	15	15	15	15	15	15
	机械压力	MPa	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	试验结果：负荷下最大伸率	%	175	175	175	175	175	175
	冷却后最大永久变形	%	15	25	15	25	15	25
4	热收缩试验							
	试验条件：温度	℃	135±3	135±3	158±3	158±3	180±3	180±3
	时间	h	1	1	1	1	1	1
	试验结果	%	4	4	4	4	4	4
5	低温卷绕试验							
	试验条件：温度	℃	−25±2	−20±2	−25±2	−20±2	−25±2	−20±2
	试验结果		不开裂	不开裂	不开裂	不开裂	不开裂	不开裂
6	低温拉伸试验							
	试验条件：温度	℃	−25±2	−20±2	−25±2	−20±2	−25±2	−20±2
	试验结果：最小伸长率	%	20	20	20	20	20	20
7	燃烧气体的腐蚀性试验							
	pH 值最小		—	4.3	—	4.3	—	4.3
	电导率最大	μS/mm	—	10	—	10	—	10

表 5.5-154 交联聚氯乙烯绝缘电缆型号和名称

型 号	名 称
BVJ—90	铜芯导体温度 90℃交联聚氯乙烯绝缘电线和电缆
RVJVJ—90	铜芯导体温度 90℃交联聚氯乙烯绝缘和护套软电缆
BVJVJ—90	铜芯导体温度 90℃交联聚氯乙烯绝缘和护套电缆
BVJVJB—90	铜芯导体温度 90℃交联聚氯乙烯绝缘和护套扁形电缆
BVJ—105	铜芯导体温度 105℃交联聚氯乙烯绝缘电线和电缆
RVJVJ—105	铜芯导体温度 105℃交联聚氯乙烯绝缘和护套软电缆
RVJ—105	铜芯导体温度 105℃交联聚氯乙烯绝缘软线

表 5.5-155 交联聚氯乙烯绝缘电缆的规格

型 号	额定电压（V）	芯 数	标称截面（mm^2）
BVJ—90 BVJ—105	450/750	1	1.5～240
BVJVJ—90	300/500	1	0.75～10
BVJVJB—90	300/500	2，3	0.75～10
RVJVJ—90 RVJVJ—105	300/500	2,3,4,5	0.75～2.5
RVJ—105	300/500	1	0.5～10

表 5.5-156 成品电缆交联聚氯乙烯绝缘和护套机械物理性能

序 号	试 验 项 目	单 位	混合物代号	
			XLPVC/XP—90，SX—90	XLPVC/XP105，SX105
1	原始力学性能 抗张强度：最小中间值 断裂伸长率：最小中间值	 MPa %	 12.5 150	 12.5 150
2	空气烘箱老化后的力学性能 老化条件：温度 时间 抗张强度：最小中间值 最大变化率 断裂伸长率：最小中间值 最大变化率	 ℃ h MPa % % %	 135±2 10×24 12.5 ±20 150 ±20	 135±2 10×24 12.5 ±20 150 ±20
3	失重试验 老化条件：温度 时间 失重：最大值	 ℃ h g/m^2	 115±2 10×24 20	 130±2 10×24 20
4	热冲击试验 试验条件：温度 时间 试验结果	 ℃ h	 150±2 1 不开裂	 150±2 1 不开裂
5	高温压力试验（GB/T 2951.6—1997） 试验条件：温度 试验结果：压痕深度最大中间值	 ℃ %	 90±2 50	 105±2 50
6	热稳定性试验 试验条件：温度 试验结果：最小平均热稳定时间	 ℃ min	 200±2 60	 200±2 60
7	热延伸试验 试验条件：温度 负荷时间 机械压力 试验结果：载荷下最大伸长率 冷却后最大永久变形	 ℃ min MPa % %	 200±3 15 0.20 100 25	 200±3 15 0.20 100 25
8	低温卷绕、拉伸、冲击试验		与热塑性聚氯乙烯相同，此处略	

3 电气装备用电线电缆的试验

3.1 试验种类

（1）例行试验。例行试验项目较少，多数品种只进行导通或直流电阻、绝缘耐电压试验、表面质量和包装。关于绝缘线芯火花电压试验，虽不属于例行试验，通常还是100%的检验，是中间质量控制的必要检验项目。对无屏蔽的单芯电线和护套电缆，用浸水电压试验很麻烦，是否可用火花电压试验替代，应研究。

（2）抽样试验。抽样试验项目较多，并且是工厂自行对产品质量控制的重要环节。通常抽样由工厂自行规定，但用户大批订货时也常要求协商抽样数量，并作为验收依据。

（3）型式试验。型式试验项目，除少数比较特殊性能外，大致与抽样试验相同。在新品种开发时，有些试验带有研究性质，待积累数据并定量后，再确定为型式试验项目，但有的认为没有必要而撤消。

3.2 试验项目汇总

电气装备电线电缆的试验项目基本上可分电气性能试验、燃烧性能试验和非电气性能试验。试验项目汇总于表5.5-157～表5.5-159。GB/T 2951是通用试验方法，应用最为普及，几乎所有的电线电缆的试验与该标准有关或部分有关，所以未说明主要试验对象，实际上电力电缆和通信电缆也经常应用该试验方法标准。

表 5.5-157　　电气性能试验项目汇总

序号	试　验　项　目	主　要　试　验　对　象	试　验　方　法
1	总则	—	GB/T 3408.1—2006
2	金属材料电阻率试验	裸导体产品	GB/T 3408.2—2006
3	半导电橡塑材料体积电阻率试验	半导电橡塑材料（不能测定成品）	GB/T 3408.3—2006
4	导体直流电阻试验	绝缘的成品电线和电缆的导体	GB/T 3408.4—2006
5	绝缘电阻试验	成品电线和电缆及其抽取的绝缘线芯	GB/T 3408.5—2006
6	耐电痕试验	绝缘架空电缆	GB/T 3408.7—2006
7	交流电压试验	所有成品电线和电缆及其抽取的绝缘线芯	GB/T 3408.8—2006
8	绝缘线芯火花试验	绝缘线芯半制品	GB/T 3408.9—2006
9	介质损耗角正切试验	中压及以上的电力电缆及相应产品	GB/T 3408.11—2006
10	局部放电试验	中压及以上的电力电缆及相应产品	GB/T 3408.12—2006
11	冲击电压试验	中压及以上的电力电缆及相应产品	GB/T 3408.13—2006
12	直流电压试验	中压及以上的电力电缆及相应产品	GB/T 3408.14—2006
13	表面电阻试验	要求在潮湿条件下工作的电线电缆	GB/T 3408.16—2006
14	挤出防蚀护套火花试验	具有外护套的金属套或铠装层电缆	GB/T 3408.—1994（参考性）
15	23℃介电常数	特殊要求产品	GB/T 2951.10—1997 第9章
16	23℃和100℃直流电阻率	特殊要求产品	GB/T 2951.10—1997 第10章

表 5.5-158　　阻燃和耐火性能试验项目汇总

序　号	试　验　项　目	主　要　试　验　对　象	试　验　方　法
1	电缆在火焰条件下的燃烧试验 单根绝缘电线或电缆的垂直燃烧试验方法 单根铜芯绝缘细电线或电缆的垂直燃烧试验方法 成束电线或电缆的燃烧试验方法	各类阻燃电线电缆	GB/T 18380.1—2001 GB/T 18380.2—2001 GB/T 18380.3—2001
2	取自电缆或光缆材料燃烧时释出气体的试验方法 卤酸气体总量的测定 用测量pH值和电导率来测定气体的酸度	无卤低烟阻燃电线电缆	GB/T 17650.1—1998 GB/T 17650.2—1998
3	电缆或光缆在特定条件下燃烧的烟密度测定 试验装置 试验步骤和要求	无卤或含卤低烟阻燃电缆	GB/T 17651.1—1998 GB/T 17651.2—1998
4	在火焰条件下电缆或光缆的线路完整性试验 试验装置火焰温度不低于750℃的单独供火 试验步骤和要求0.6/1.0kV及以下电缆 试验步骤和要求数据电缆 试验步骤和要求光缆	各类耐火电线电缆	GB/T 19216.11—2003 GB/T 19216.21—2003 GB/T 19216.23—2003 GB/T 19216.25—2003

表 5.5-159　　非电气性能试验项目汇总

续表

序号	试验项目	试验方法
1	总则	GB/T 2951.1—10—1997
2	绝缘厚度测量	GB/T 2951.1—1997 第8.1条
3	护套厚度测量	GB/T 2951.1—1997 第8.2条
4	外形尺寸测量	GB/T 2951.1—1997 第8.3条
5	绝缘机械性能	GB/T 2951.1—1997 第9.1条
6	护套机械性能	GB/T 2951.1—1997 第9.2条
7	空气箱热老化试验	GB/T 2951.2—1997 第8.1条
8	空气弹老化试验	GB/T 2951.2—1997 第8.2条
9	氧弹老化试验	GB/T 2951.2—1997 第8.3条
10	密度测定：悬浮法	GB/T 2951.3—1997 第8.1条
11	比重瓶法	GB/T 2951.3—1997 第8.2条
12	吸水试验：电压法 重量法	GB/T 2951.3—1997 第9.1条 GB/T 2951.3—1997 第9.2条
13	绝缘收缩试验	GB/T 2951.3—1997 第10章
14	PE护套收缩试验	GB/T 2951.3—1997 第11章
15	绝缘低温卷绕试验	GB/T 2951.4—1997 第8.1条
16	护套低温卷绕试验	GB/T 2951.4—1997 第8.2条
17	绝缘低温拉伸试验	GB/T 2951.4—1997 第8.3条
18	护套低温拉伸试验	GB/T 2951.4—1997 第8.4条
19	低温冲击试验①	GB/T 2951.4—1997 第8.5条
20	耐臭氧试验	GB/T 2951.5—1997 第8章
21	热延伸试验	GB/T 2951.5—1997 第9章
22	耐矿物油试验	GB/T 2951.5—1997 第10章
23	绝缘高温压力试验	GB/T 2951.6—1997 第8.1条
24	护套高温压力试验	GB/T 2951.6—1997 第8.2条
25	绝缘抗开裂试验	GB/T 2951.6—1997 第9.1条
26	护套抗开裂试验	GB/T 2951.6—1997 第9.2条
27	绝缘失重试验	GB/T 2951.7—1997 第8.1条
28	护套失重试验	GB/T 2951.7—1997 第8.2条
29	热稳定试验②	GB/T 2951.7—1997 第9章
30	环境应力开裂试验	GB/T 2951.8—1997 第8章
31	热老化后卷绕试验	GB/T 2951.8—1997 第9章
32	熔体指数测定	GB/T 2951.8—1997 第10章
33	处理后断裂伸长率③	GB/T 2951.9—1997 第8章
34	处理后卷绕试验④	GB/T 2951.9—1997 第9章
35	热老化卷绕试验	GB/T 2951.9—1997 第10章
36	绝缘增量测定	GB/T 2951.9—1997 第11章
37	长期热稳定试验	GB/T 2951.9—1997 附录A
38	铜催化降解试验	GB/T 2951.9—1997 附录B
39	滴点测定	GB/T 2951.10—1997 第4章
40	油分离试验	GB/T 2951.10—1997 第5章
41	低温脆性试验	GB/T 2951.10—1997 第6章
42	总酸值测定	GB/T 2951.10—1997 第7章
43	腐蚀性试验	GB/T 2951.10—1997 第8章

① 包括绝缘和护套，具体按产品标准。
② 包括绝缘和护套，具体按产品标准。
③ 包括绝缘和护套，处理条件按产品标准。
④ 包括绝缘和护套，处理条件按产品标准。

关于电线电缆的绝缘线芯火花试验简介（详见GB/T 3408.9《绝缘线芯火花试验》）。

（1）试验的意义。火花试验机的电极上持续施加稳定的试验电压，电缆绝缘线芯的导体接地，当绝缘线芯通过火花

试验极电机时，这部分绝缘线芯将经受施加电压的试验，施加电压的时间也就是等于绝缘线芯通过电极的时间。试验电压为工频或直流，目前高频和脉冲电压尚未列入标准。火花试验电压不应太低，从原理上说该电压应当造成电极周围空气产生电离，绝缘似乎被电离层包围。

（2）试验要求。工频高压电源的频率为(45～65)Hz，电压波形应近似正弦波。电压值的误差应不超过±5%。直流高压电源的正极应接地，负极由一根低电容的非屏蔽电线与试验电极相连，直流输出电压纹波，其峰对峰值应不超过直流电压的5%。电压值误差应不超过±5%。试验电压见表5.5-160。绝缘线芯上任何一点，通过有效电极时间为：工频高压不少于0.05s；直流高压不少于0.001s。

表5.5-160 火花试验电压推荐值

绝缘标称厚度 δ（mm）	工频火花试验电压（kV）	直流火花试验电压（kV）
$\delta \leqslant 0.25$	3	5
$0.25 < \delta \leqslant 0.5$	4	6
$0.5 < \delta \leqslant 1.0$	6	9
$1.0 < \delta \leqslant 1.5$	10	15
$1.5 < \delta \leqslant 2.0$	15	23
$2.0 < \delta \leqslant 2.5$	20	30
$2.5 < \delta$	25	38

（3）火花机的基本参数。目前标准规定的工频或直流火花试验机电极的有效宽度应大于被试线芯的最大直径30mm。底部可制成“V”形或“U”形，电极箱壳体应接地。电极可用金属珠链或环链，链长应大于“V”形或“U”形底部电极的深度。任何相邻两链的间距应不大于8mm。珠的直径为2～5mm，一串珠链上的相邻两颗珠子的间距应不超过2.5mm。环由直径大于0.8mm的金属丝构成，圆环的外径应不大于5mm，如用椭圆形等其他形状，其狭边应不大于5mm，每100mm长的环链上，环数应不少于20个。链上的珠或环应分布均匀，表面光滑，不应有刮伤试样绝缘的毛刺，且每一节珠或环应灵活可挠。珠链或环链应交叉排列。试验电极的两端应有接地保护电极。保护电极的尺寸应与电极相匹配，保护电极（轴向）长度不小于15mm，所用珠链或环链应与试验电极一致。保护电极与试验电极之间距离应保证在正常最高试验电压下，不发生试样绝缘表面闪络。安全保护连锁装置应保证开启试验电极箱时自动断开高压电源。击穿指示器由数字显示计数器和讯响报警器组成，能对每次击穿记录和报警。击穿指示器应能保持其指示数，直至下一个击穿被记录或指示器被人工复位。火花试验机应按JB/T 4278.10规定的检定方法进行检定。每年应至少检定一次，在大修或较大程度调整后，也应进行检定。

根据GB/T 19666—2005《阻燃和耐火电线电缆通则》标准对燃烧特性的代号加以统一，详见表5.5-161和表5.5-162。

表5.5-161 燃烧特性代号

代 号	名 称	代 号	名 称
Z	阻燃	W	无卤
ZA	阻燃A类	D	低烟
ZB	阻燃B类	U	低毒
ZC	阻燃C类	N	耐火
ZD	阻燃D类	NJ	耐火加冲击
省略	有卤	NS	耐火加喷水

表5.5-162 现行产品燃烧特性代号

系列名称		代 号	名 称
阻燃系列	有卤	ZA	阻燃A类
		ZB	阻燃B类
		ZC	阻燃C类
		ZD	阻燃D类
	无卤低烟	WDZ	无卤低烟阻燃
		WDZA	无卤低烟阻燃A类
		WDZB	无卤低烟阻燃B类
		WDZC	无卤低烟阻燃C类
		WDZD	无卤低烟阻燃D类
耐火系列	有卤	N	耐火
		ZAN	阻燃A类耐火
		ZBN	阻燃B类耐火
		ZCN	阻燃C类耐火
		ZDN	阻燃D类耐火
	无卤低烟	WDZN	无卤低烟阻燃耐火
		WDZAN	无卤低烟阻燃A类耐火
		WDZBN	无卤低烟阻燃B类耐火
		WDZCN	无卤低烟阻燃C类耐火
		WDZDN	无卤低烟阻燃D类耐火

注 1. 有多种燃烧特性要求时，其代号按无卤（有卤省略）、低烟、低毒、阻燃或耐火的顺序排列。

2. 其他代号在考虑中。

第 6 章　通信电缆和通信光缆

通信电缆是传输电话、电报、电视、广播、传真、数据和其他电信信息的电缆。与早期架空明线通信和无线通信相比，通信电缆多埋于地下（包括管道中），很少受大气和自然灾害的影响，传输信息的质量较高，性能稳定。近年来，随着光、电信号转换技术的高度发展，通信光缆也已广泛用于通信系统。由于通信光缆传输衰减小、传输频带宽、重量轻、外径小，不受电磁场干扰，因此通信光缆有逐渐替代通信电缆的趋势，既可节省大量铜和其他材料，提高通信保密性，又可提高信息传输质量。

有线通信另一个发展趋向是，脉码调制（PCM）的数字通信（时分制）已逐渐代替了以往使用的模拟通信（频分制）。数字通信的抗干扰性能优良，保密性强，用途广泛，但要求传输媒质的传输频带宽。由于通信光缆的传输频带宽，衰减小，因此更适用于数字通信。

通信电缆按元件结构类型可分为对称电缆和同轴电缆两种，对称电缆中，线对由 2 根结构相同的绝缘导线组成，线对以对绞或星绞型式绞合、对称于线对纵向轴线。对称电缆的特点是：当电流频率增高时，电磁感应的作用增大，使传输回路间相互干扰及外界干扰都成为突出问题。同轴电缆中主要元件是同轴对，它的内外是对地不对称的，内导线在另一圆柱外导体的轴心中。同轴对的特点是电磁场基本封闭于外导体之内，高频时回路间相互干扰和外界干扰都比对称电缆小，而且频率愈高，这两种干扰愈小，因此宜在很高频率中使用。

目前公共通信网中通信电缆按使用场合的不同可分 3 类：①市内通信电缆，一般都采用对称电缆；②长途对称通信电线，一般用于几十公里到上千公里距离。但必须指出，新建线路绝大多数采用光缆；③同轴（干线）通信电缆，一般用于几百公里以上的长距离通信。也应指出，目前新建线路均已采用光缆。但是铁路用综合光缆例外，由于其使用特点，光元件和电元件综合成一体。从近代通信技术发展来看，不只局限于前 3 种情况，用于数字通信系统的对绞和星绞多芯对称电缆，即 5 号缆、超 5 号缆、6 号缆和 7 号缆已成为当前热门产品，广泛应用于综合业务数字网（ISDN）、局域网和数据通信系统。与此同时，移动通信和有线电视的高度发展又促使射频电缆革新，这类同轴型电缆的使用频率达到了 VHF 和 UHF 无线电频率范围，传输距离能达到数十米到数百米。此外射频电缆还包括波导、介质波导及表面波传输线等。

另一部分是通信设备用电缆，属配套性质，一般工作频率较低，如局用电缆等。通信电缆还有很多其他品种，如野外（野战）通信电缆等。以上只是将用量较多的产品作一概述。

1　通信电缆的基本结构及常用性能参数定义

通信电缆由导体、绝缘、绞合（对线组、三线组、四线组、五线组）、单元屏蔽、缆芯（有层绞式和单位式）、护层和铠装等部分组成。

1.1　通信电缆的导体

通信电缆的导体大部分为单根铜线，过去曾有一部分农村通信电缆用单根铝线，最近又提出用铜包铝线的可能性。架空通信线和用户线可用铜线、镀锡铜线、铜包钢线或镀铜钢线。导线除同轴对有特殊要求外，通常采用 GB 3953《电工圆铜线》规定的 TR 软圆铜线。同轴电缆内导线一般为半硬铜线，标称直径通常为 1.2mm 和 2.6mm，外导体通常由软铜带纵包成管状结构。射频电缆内导体可采用单线、管子或绞线、圆线（或带）绕包构成，材料可采用铜导体、铜包钢线和镀银铜导体。外导体（或屏蔽层）可采用编织、绕包和管状形式，材料可采用裸铜线、镀锡铜线、镀银铜线等。较小的有线电视传输电缆外导体结构为：先搭盖纵包一层铝塑薄膜，铝面向外，需要时再平行放置一根供接地的裸铜线，然后稀疏编织镀锡铜线或铝合金线。尽管导体比较简单，但导体的电阻率、直径尺寸及其偏差均应从严把握，否则会影响信号传输质量。

通信电缆早期无专用导体标准，数字通信电缆发展后，近期已制订了 GB/T 18213—2000 标准，该标准等同采用 IEC 60344—1980。虽然不是所有的通信电缆导体必须符合该标准要求，但数字通信电缆引用了此标准，并说明在不同敷设场合，选用单线、绞线和金皮线等结构。绝缘铜导体 20℃时导体的最大电阻计算公式如下：

$$R = R_0 k_1 k_2 k_3 k_4 \tag{5.6-1}$$

$$R_0 = 21.95/nd^2 \tag{5.6-2}$$

式中：R 为最大电阻 Ω/km；n 为导体中单线根数，对于实心导体 $n=1$；d 为导体中单线标称直径，对于实心导体即为其标称直径；k_1 为考虑单线直径及有镀层或无镀层的系数，见表 5.6-1；k_2 为考虑导体类别的系数，实心导体为 1.00，绞合导体为 1.04；k_3 为考虑导体尺寸及绝缘导体扭绞方式的扭绞系数，单芯电缆为 1，其他见表 5.6-2；k_4 为大于一个绞合元件电缆的成缆系数，见表 5.6-3。

实心导体和绞合导体电阻计算结果见表 5.6-4 和表 5.6-5。

表 5.6-1　　k_1 值

导体中单线最大直径 d（mm）	k_1 值					
	实心导体			绞合导体		
	镀镍	镀锡	无镀层或镀银	镀镍	镀锡	无镀层或镀银
$0.05<d\leqslant0.10$	—	—	—	1.20	1.12	1.07
$0.10<d\leqslant0.31$	1.16	1.08	1.05	1.15	1.07	1.04
$0.31<d\leqslant0.91$	1.13	1.05	1.03	1.12	1.04	1.02
$0.91<d\leqslant3.60$	—	1.04	1.03	—	1.03	1.02

表 5.6-2　　k_3 值

扭绞节径比	k_3 值					
	实心导体标称直径 d（mm）			绞合导体标称截面 S（mm²）		
	$d<0.4$	$0.4\leqslant d<0.8$	$d\geqslant0.8$	$S<0.15$	$0.15\leqslant S<0.5$	$S\geqslant0.5$
>16	1.04	1.03	1.02	1.04	1.03	1.02
≤16	1.07	1.06	1.05	1.07	1.06	1.05

表 5.6-3 k_4 值

成缆节径比	k_4 值			
	实心导体标称直径 d(mm)		绞合导体标称截面 S(mm²)	
	$d<0.8$	$d\geqslant0.8$	$S<0.5$	$S\geqslant0.5$
>16	1.03	1.02	1.03	1.02
≤16	1.06	1.05	1.06	1.05

表 5.6-4 实心导体电阻计算值

导体标称直径 (mm)	系数				计算电阻 (Ω/km)
	k_1	k_2	k_3	k_4	
0.12	1.05	1.00	1.00	1.00	1600.52
	1.08	1.00	1.00	1.00	1646.25
	1.16	1.00	1.00	1.00	1768.19
0.15	1.05	1.00	1.00	1.00	1024.33
	1.08	1.00	1.00	1.00	1053.60
	1.16	1.00	1.00	1.00	1131.64
0.20	1.05	1.00	1.00	1.00	576.188
	1.08	1.00	1.00	1.00	592.650
	1.16	1.00	1.00	1.00	636.550
0.25	1.05	1.00	1.00	1.00	378.760
	1.08	1.00	1.00	1.00	369.296
	1.16	1.00	1.00	1.00	407.392
0.32	1.03	1.00	1.00	1.00	220.786
	1.05	1.00	1.00	1.00	225.073
	1.13	1.00	1.00	1.00	242.222
0.40	1.03	1.00	1.00	1.00	141.303
	1.05	1.00	1.00	1.00	144.074
	1.05	1.00	1.03	1.00	148.368
	1.05	1.00	1.03	1.03	152.819
	1.13	1.00	1.00	1.00	155.022
0.50	1.03	1.00	1.00	1.00	90.434 0
	1.05	1.00	1.00	1.00	92.190 0
	1.05	1.00	1.03	1.00	94.955 7
	1.05	1.00	1.03	1.03	97.804 4
	1.13	1.00	1.00	1.00	90.214 0
0.60	1.05	1.00	1.00	1.00	64.020 8
	1.05	1.00	1.00	1.00	65.941 5
	1.05	1.00	1.03	1.03	67.919 7
0.80	1.05	1.00	1.00	1.00	36.011 7
	1.05	1.00	1.02	1.00	36.732 0
	1.05	1.00	1.02	1.02	37.466 6
1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	22.828 0
	1.04	1.00	1.02	1.00	23.284 6
	1.04	1.00	1.02	1.02	23.750 3
1.40（1.38）	1.04	1.00	1.00	1.00	11.987 0
	1.04	1.00	1.02	1.00	12.226 7
	1.04	1.00	1.02	1.02	12.471 3

表 5.6-5 绞合导体电阻计算值

导体标称截面 (单线根数×单线标称直径/mm) (mm²)		系数				计算电阻 (Ω/km)
		k_1	k_2	k_3	k_4	
0.035(7×0.08)		1.07	1.04	1.00	1.00	545.222
		1.12	1.04	1.00	1.00	570.700
		1.20	1.04	1.00	1.00	611.464
0.055(7×0.10)		1.07	1.04	1.00	1.00	348.942
		1.12	1.04	1.00	1.00	365.248
		1.20	1.04	1.00	1.00	391.337
0.079(7×0.12)		1.04	1.04	1.00	1.00	235.527
		1.07	1.04	1.00	1.00	242.321
		1.15	1.04	1.00	1.00	260.438
0.124(7×0.15)		1.04	1.04	1.00	1.00	150.737
		1.07	1.04	1.00	1.00	155.085
		1.15	1.04	1.00	1.00	166.681
0.220(7×0.20)		1.04	1.04	1.00	1.00	84.789 7
		1.07	1.04	1.00	1.00	87.235 6
		1.07	1.04	1.03	1.00	89.852 6
		1.07	1.04	1.03	1.03	92.548 2
		1.15	1.04	1.00	1.00	93.757 9
0.340(7×0.25)		1.04	1.04	1.00	1.00	54.265 4
		1.07	1.04	1.00	1.00	55.830 8
		1.15	1.04	1.00	1.00	60.005 0
0.500	(28×0.15)	1.07	1.04	1.00	1.00	38.771 4
		1.07	1.04	1.02	1.00	39.546 4
		1.07	1.04	1.02	1.02	40.373 7
	(16×0.20)	1.07	1.04	1.00	1.00	38.165 6
		1.07	1.04	1.02	1.00	38.928 9
		1.07	1.04	1.02	1.02	39.707 5
0.560(7×0.25)		1.02	1.04	1.00	1.00	32.484 0
		1.04	1.04	1.00	1.00	33.121 0
		1.12	1.04	1.00	1.00	35.668 7
0.750	(42×0.15)	1.07	1.04	1.00	1.00	25.847 6
		1.07	1.04	1.02	1.00	26.364 5
		1.07	1.04	1.02	1.02	26.891 8
	(24×0.20)	1.07	1.04	1.00	1.00	25.443 7
		1.07	1.04	1.02	1.00	25.952 6
		1.07	1.04	1.02	1.02	26.471 6
1.000(32×0.20)		1.07	1.04	1.00	1.00	19.082 8
		1.07	1.04	1.02	1.00	19.464 4
		1.07	1.04	1.02	1.02	19.853 7
1.500(30×0.25)		1.07	1.04	1.00	1.00	13.027 2
		1.07	1.04	1.02	1.00	13.287 7
		1.07	1.04	1.02	1.02	13.553 5

1.2 通信电缆的绝缘

通信电缆绝缘线芯应具有较高的绝缘电阻、低的介电常数 ε、低的介质损耗正切 $\tan\delta$ 和有一定的耐电压水平，既要满足线路传输特性的要求，又要考虑经济性，因此绝缘结构往往包含着空气，以减小传输损耗，又有足够稳定性和均匀性。20 世纪 80 年代以前，市内和长途通信电缆的对称元件基本上都采用空气—纸绝缘，前者由导体外松包纸带构成，后者由导体外先缠绕纸绳再绕包纸带构成，现已停产。当今则采用聚乙烯或聚丙烯等聚烯烃挤包的实心绝缘或泡沫绝缘或皮泡皮绝缘，也有少量采用聚乙烯绳管绝缘。同轴对则主要采用空气—塑料绝缘，内外导体为 1.2/4.4mm 的小同轴通信电缆采用鱼泡式绝缘，见图 5.6-1。内外导体为2.6/9.5mm

的中同轴通信电缆采用聚乙烯垫片式绝缘，见图 5.6-2。射频电缆绝缘有 3 种形式：实心塑料绝缘、空气绝缘和半空气绝缘。空气绝缘是指电缆的内外导体间，除了以一定间隔或螺旋式固定在内导体上的支持物外，其余均为空气。半空气绝缘是指电缆内外导体间，除支持物外，内外导体之间隔一层固体介质，此类绝缘包括泡沫绝缘、聚乙烯绳管绝缘、鱼泡式绝缘等。射频电缆由于特殊性能要求，绝缘材料除了聚乙烯外，有时还采用聚四氟乙烯、聚全氟乙丙烯、物理发泡可融性聚四氟乙烯以及耐高温的无机绝缘等。通信设备用电缆，常用质量高的聚氯乙烯。参考 QB/T 3105—1999 标准，电话纸性能见表 5.6-6；常用聚乙烯和聚丙烯性能见表 5.6-7，发泡聚乙烯性能见表 5.6-8。为了使电缆和接插件很好配合，便于安装施工，射频电缆绝缘外径标称值应符合其详细规范的规定。

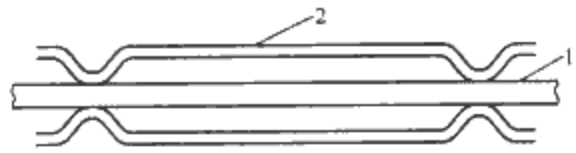


图 5.6-1　鱼泡式绝缘同轴对示意图
1—导体；2—鱼泡绝缘

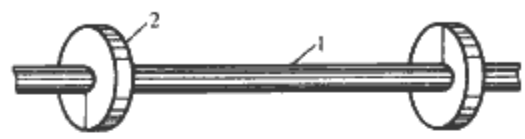


图 5.6-2　垫片式绝缘同轴对示意图
1—导体；2—垫片绝缘

表 5.6-6　　电　话　纸　性　能　指　标

项　目		单　位	指　标					
			DH—50			DH—75		
			A	B	C	A	B	C
厚度及公差		mm	0.050	公差	+0.004 −0.002	0.075	公差	+0.006 −0.003
紧　度	≤	g/cm³	0.80	0.82	0.82	0.80	0.82	0.82
抗张强度	≥ 纵	kN/m	4.05	3.60	3.27	4.90	0.70	4.58
	横		1.58	1.58	1.44	1.96	1.96	1.96
伸长率	≥ 纵	%	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	横		4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
灰　分	≤	%	0.80	1.00	1.00	0.80	1.00	1.00
水抽出液电导率	≤	mS/m	5.0	7.0	10.0	5.0	7.0	10.0
水　分		%	5.0～8.0					

表 5.6-7　　聚　烯　烃　性　能　指　标

序号	项　目	单　位	低密度聚乙烯（LDPE）	中密度聚乙烯（MDPE）	高密度聚乙烯（HDPE）	聚丙烯（PP）
1	颜色		本色	本色	本色	本色
2	流体流动速率	g/10min	≤0.4	≤1.0	≤1.0	2.0～3.5
3	密度	g/cm³	≤0.925	0.926～0.940	0.941～0.959	0.895～0.915
4	抗拉强度	MPa	≥12	≥17	≥19	≥21
5	断裂伸长率	%	≥500	≥400	≥400	≥200
6	介电常数(0.1MHz 和 1.0MHz)		≤2.33	≤2.36	≤2.40	≤2.30
7	介质损耗(0.1MHz 和 1.0MHz)		≤5×10^{-4}	≤5×10^{-4}	≤5×10^{-4}	≤5×10^{-4}
8	体积电阻率	Ω·m	≥1×10^{13}	≥1×10^{13}	≥1×10^{12}	≥1×10^{12}
9	氧化诱导期(铜杯)	min	≥30	≥30	≥30	≥30
10	低温脆性 −76℃ −15℃	失效数 失效数	≤2/10 —	≤2/10 —	≤2/10 —	— ≤2/10
11	耐热应力开裂性 96h	失效数	—	—	0/9	0/9
12	耐环境应力 48h	失效数	—	≤2/10	≤2/10	≤0/10
13	浸水稳定性		浸水后仍符合本表第 6 项和第 7 项指标			
14	水分	%	≤0.1	≤0.1	≤0.1	≤0.1
15	与填充膏相容性：重量变化 缠绕	%	— —	≤15 不开裂	≤15 不开裂	≤15 不开裂

表 5.6-8 发泡聚乙烯性能指标

序号	项 目	单 位	MDPE/F	HDPE/F
1	颜色		淡黄色	淡黄色
2	流体流动速率	g/10min	≤1.0	≤1.0
3	密度	g/cm³	0.926～0.940	0.941～0.959
4	低温脆性－76℃	失效数	≤2/10	≤2/10
5	抗拉强度	MPa	≥14.0	≥17.0
6	断裂伸长率	%	≥400	≥400
7	氧化诱导期	min	≥30	≥30
8	介电常数(1.0MHz)		≤2.36	≤2.36
9	介质损耗(1.0MHz)		$\leqslant 1\times10^{-3}$	$\leqslant 1\times10^{-3}$
10	体积电阻率	Ω·m	$\geqslant 1\times10^{13}$	$\geqslant 1\times10^{13}$
11	发泡度	%	30～70	30～70
12	已发泡颗粒数	粒/50g	≤4	≤4
13	与填充膏相容性：重量变化 缠绕	%	≤15 不开裂	≤15 不开裂

1.3 线对和线组的绞合

绞合结构型式看来似乎比较简单，实际上绞合工艺对成品质量影响较大，要求线对或线组有严格的对称性，具有较小的导体电阻偏差、电阻不平衡和电容不平衡等指标。

（1）对绞组是由 2 根不同颜色绝缘线芯均匀绞合而成的线对。成品的市内通信电缆中，线对的绞合节距应不大于 155mm，每一基本单位（25 对、10 对）中，所有线对的绞合节距应各不相同，绞合质量会直接影响电缆的串音特性。

（2）星绞组是由 4 根不同颜色绝缘线芯均匀绞合而成。市内通信电缆通常由若干的对绞或星绞组构成，目前国内较多采用对绞形式。

（3）同轴对在聚乙烯鱼泡（或垫片）的绝缘线芯上，纵包 0.15（或 0.25）mm 厚的软铜带，构成管状外导体，并绕包两层 0.1（或 0.15）mm 厚屏蔽用的镀锡铜带，以及一层绝缘带，就构成了同轴对。射频电缆同轴对往往在绝缘线芯外编织、绕包或管状外导体组成，因此同轴对不存在线对绞合工序。

1.4 线对和线组的屏蔽

对于某些设备配套用电缆，其线对或线组需有单独的屏蔽层，也称单元屏蔽或屏蔽元件，以防止线对或线组间的干扰。其结构有以下几种：

（1）单元外编织铜线或镀锡铜线，编织密度按技术要求规定，必要时在单元外搭盖绕包一层聚酯薄膜。

（2）单元外紧密缠绕一层细铜线或镀锡铜线，然后反向缠绕涤纶纱线扎紧。这种结构适用于软电缆。

（3）单元外双向各缠绕一层细铜线和镀锡铜线，内层应紧密缠绕，外层允许稀疏缠绕，然后搭盖绕包一层聚酯薄膜。

（4）单元外搭盖绕包一层聚酯薄膜金属（铝或铜箔）复合带，金属面必须朝里，在绕包时应平行放置一根镀锡绞线作为引线，其截面应按技术要求规定，引线的作用是便于接地和保持屏蔽层的连续性，最后再搭盖绕包一层聚酯薄膜。

1.5 缆芯的结构（成缆）

市内通信电缆缆芯结构有两种：同心式和单位式。同心式缆芯是由若干线对按同心方式绞合而成，见图 5.6-3。单位式缆芯是先以 50 对或 100 对及相应预备对绞合成一个单位，再由若干单位绞合成缆芯，见图 5.6-4。也可由若干基本单位（25 对或 10 对）绞合组成。填充式塑料绝缘的市内通信电缆缆芯，其空隙中应填充胶状物，一般填充石油膏，以防止外界水分渗入缆芯，参考 JB/T 8502—1996 标准，石油膏型号和性能见表 5.6-9 和表 5.6-10。综合同轴电缆结构比较复杂，除同轴对外还包含高、低频星绞组、信号组和信号线等元件。

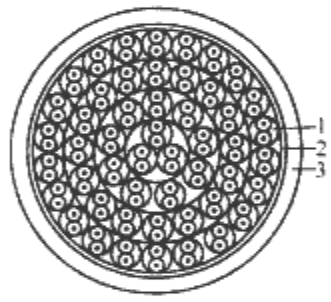


图 5.6-3 同心式缆芯
1—线对；2—包带；3—护套

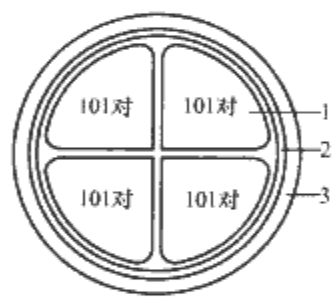


图 5.6-4 单位式缆芯
1—单位元件；2—包带；3—护套

表 5.6-9 石油膏型号和用途

型 号	特 征	主 要 用 途
THR	热熔型，一定温度下为液态和半液态	适合于一般场合
THC	触变型，可在常温下填充	适合于所有场合

表 5.6-10 石 油 膏 性 能

序号	项 目 名 称	试 验 条 件	单 位	性 能 要 求	
				THR 型	THC 型
1	物理性能				
1.1	滴点		℃	≥65	≥150
1.2	锥入度	25℃	1/10mm	≥45	≥200
1.3	黏度	120℃	mm²/s	≥10	—
1.4	闪点	开口	℃	≥220	≥220
1.5	油分离	50℃±1℃，24h	%	≤5	—
		80℃±1℃，24h	（质量分数）	—	≤5
1.6	低温脆性	－10℃±1℃，24h	失效率	≤2/10	—
1.7	收缩率	熔融状态冷却到 25℃	%	≤8	—
2	化学性能				
2.1	颜色稳定性	130℃，120h±1h		≤2.5	≤2.5
2.2	酸值		mgKOH/g	≤1.0	≤1.0
2.3	氧化诱导期	190℃±℃，铜杯	min	≥10	≥10
2.4	腐蚀性	80℃±2℃，336h		无腐蚀点	无腐蚀点

续表

序号	项目名称	试验条件	单位	性能要求	
				THR 型	THC 型
3	电气性能				
3.1	介电常数	23℃±2℃，1MHz		≤2.3	≤2.3
3.2	介质损耗	23℃±2℃，1MHz		$\leqslant 2\times10^{-3}$	$\leqslant 2\times10^{-3}$
3.3	体积电阻率	23±2℃	Ω·cm	$\geqslant 1\times10^{13}$	$\geqslant 1\times10^{13}$
4	与通信电缆材料相容性				
4.1	与聚烯烃绝缘相容性	70℃±1℃，672h		合格	合格
4.2	与聚烯烃护套相容性	70℃±1℃，672h		合格	合格
4.3	与金属复合带相容性	70℃±1℃，168h		合格	合格

1.6　通信电缆的护层

通信电缆护层是为防潮、防腐、机械保护、及屏蔽电磁场等。护层包括内护套（若有）和外护套。不同的敷设环境、其力学性能和电气性能要求不同，护层可分为铅护层、铝护层、焊接钢管护层及聚乙烯—金属（铝或钢）粘结综合护层（具有挡潮功能）。参考 YD/T 723—1994 标准，铝塑和钢塑复合带的品种、规格和性能见表 5.6-11～表 5.6-16。射频电缆护套可由聚乙烯、聚氯乙烯、无卤低烟阻燃聚烯烃、耐光热聚乙烯、耐辐照聚乙烯、聚全氟乙丙烯、可融性聚四氟乙烯或其他适当材料制成。

表 5.6-11　　铝塑复合带品种

型号	产品名称	型号	产品名称
YL	聚乙烯型单面铝塑复合带	EL	共聚物型单面铝塑复合带
YLY	聚乙烯型双面铝塑复合带	ELE	共聚物型双面铝塑复合带

表 5.6-12　　铝塑复合带厚度及公差

铝带标称厚度（mm）	铝塑复合带标称厚度及公差（mm）		塑料层标称厚度及公差（mm）
	YL、EL 型	YLY、ELE 型	
0.10	0.16±0.021	0.27±0.034	0.058±0.013
0.15	0.21±0.025	0.27±0.038	0.058±0.013
0.20	0.26±0.029	0.32±0.042	0.058±0.013

表 5.6-13　　铝塑复合带性能指标

序号	项目		单位	指标
1	抗张强度		MPa	≥54
2	断裂伸长率		%	≥15
3	铝带与塑料层的剥离强度		N/cm	≥6.13
4	铝塑复合带的热合强度		N/cm	≥17.5
5	耐水性　在 68℃±1℃水中浸 168h 后的剥离强度		N/cm	≥6.13
6	耐填充复合物性能 68℃±1℃，168h		—	铝带与塑料模不分层
7	抗腐蚀性能 0.1mol/L，NaOH，480h		—	≥7 级
8	介电强度	单面铝塑复合带　直流 1kV　1min	kV	不击穿
		双面铝塑复合带　直流 2kV　1min	kV	不击穿
9	铝塑复合带热合区的剪切强度：塑料层与铝带间的粘结先产生破坏，而塑料层间的热合区不产生剪切破坏			

表 5.6-14　　钢塑复合带品种

型号	产品名称	型号	产品名称
YG	聚乙烯型单面钢塑复合带	EG	共聚物型单面钢塑复合带
YGY	聚乙烯型双面钢塑复合带	EGE	共聚物型双面钢塑复合带

表 5.6-15　　钢塑复合带厚度及公差

钢带标称厚度（mm）	钢塑复合带标称厚度及公差（mm）		塑料层标称厚度及公差（mm）
	YD、EG 型	YGY、EGE 型	
0.15	0.21±0.023	0.27±0.036	0.058±0.013
0.20	0.26±0.023	0.32±0.036	0.058±0.013

表 5.6-16　　钢塑复合带性能指标

序号	项目		单位	指标
1	抗张强度		MPa	≥300
2	断裂伸长率		%	≥15
3	钢带与塑料层的剥离强度		N/cm	≥6.13
4	钢塑复合带的热合强度		N/cm	≥17.5
5	耐水性　在 68℃±1℃水中浸 168h 后的剥离强度		N/cm	≥6.13
6	耐填充复合物性能　68℃±1℃，168h		—	钢带与塑料模不分层
7	抗腐蚀性能　0.1mol/L，HCl，480h		—	≥7 级
8	介电强度	单面钢塑复合带　直流 1kV　1min	kV	不击穿
		双面钢塑复合带　直流 2kV　1min	kV	不击穿
9	钢塑复合带热合区的剪切强度：塑料层与钢带间的粘结先产生破坏，而塑料层间的热合区不产生剪切破坏			

1.7　通信电缆的铠装

电缆埋地敷设时，为防止外力损伤，需绕包镀锌钢带或涂塑钢带；敷设在水底或需要承受拉力的场合下，电缆应缠绕镀塑或镀锌钢线，以增加抗拉强度，这些统称为铠装层。纵包轧纹粘结钢带既是密封护层，也有一定的铠装保护作用，如防止气枪铅弹射穿等。具有金属套和没有金属套的固定敷设方式的通信电缆外护层种类见表 5.6-17 和表 5.6-18。有关钢带铠装和铝带铠装的参数见表 5.6-19 和表 5.6-20，钢丝铠装参数见表 5.6-21，外护套参数见表 5.6-22。

表 5.6-17　　适用于具有金属套的固定敷设方式的通信电缆外护层

型号	名　称	被保护金属套	主要适用敷设场所										
			敷设方式									其他	
			架空	室内	隧道	电缆沟	管道	埋地		竖井	水下	腐蚀	拉力
								一般土壤	多砾石地				
02	聚氯乙烯外套	铅　套	△	△	△	△	△	△				△	
		铝　套	△	△	△	△	△	△		△		△	
03	聚乙烯外套（含阻燃）	铅　套	△	△	△	△	△	△				△	
		铝　套	△	△	△	△	△	△		△		△	
22	钢带铠装聚氯乙烯外套	铅　套		△	△	△		△	△			△	
		铝　套		△	△	△		△	△			△	
23	钢带铠装聚乙烯外套（含阻燃）	铅　套		△		△		△	△			△	
		铝　套		△		△			△			△	
32	细圆钢丝铠装聚氯乙烯外套	各种金属套						△	△	△	△	△	△
33	细圆钢丝铠装聚乙烯外套	各种金属套								△	△	△	△
41	粗圆钢丝铠装纤维外被	铅　套									△	○	△
42	粗圆钢丝铠装聚氯乙烯外套	铅　套								△	△	△	△
43	粗圆钢丝铠装聚乙烯外套	铅　套								△	△	△	△
441	双粗圆钢丝铠装纤维外被	铅　套									△	○	△
241	钢带—粗圆钢丝铠装纤维外被	铅　套									△	○	△

注　△表示适用；○表示当采用涂塑钢丝等具有良好非金属防蚀层钢丝时适用。

表 5.6-18　　适用于非金属套的固定敷设方式的通信电缆外护层

型号	名　称	主要适用敷设场所									
		敷设方式								其他	
		室内	隧道	电缆沟	管道	埋　地		竖井	水下	腐蚀	拉力
						一般土壤	多砾石地				
22	钢带铠装聚氯乙外套	△	△	△		△	△			△	
23	钢带铠装聚乙烯外套（含阻燃）	△		△		△	△			△	
32	细圆钢丝铠装聚氯乙烯外套					△	△	△	△	△	△
33	细圆钢丝铠装聚乙烯外套							△	△	△	△
41	粗圆钢丝铠装纤维外被								△	○	△
42	粗圆钢丝铠装聚氯乙烯外套							△	△	△	△
43	粗圆钢丝铠装聚乙烯外套							△	△	△	△
62	铝带铠装聚氯乙烯外套	△	△	△		△	△			△	
63	铝带铠装聚乙烯外套（含阻燃）	△	△	△		△	△			△	
441	双粗圆钢丝铠装纤维外被								△	○	△
241	钢带—粗圆钢丝铠装纤维外被								△	○	△

注　△表示适用；○表示当采用涂塑钢丝等具有良好非金属防蚀层钢丝时适用。

表 5.6-19　　金属护套钢带铠装参数参考表　　mm

铠装前假设直径	层数×厚度不小于	宽度不大于
≤15.0	2×0.3	20
15.1～20.0	2×0.5	25
20.1～25.0	2×0.5	30
25.1～40.0	2×0.5	35
40.1～50.0	2×0.5	45
50.1～60.0	2×0.5	60
≥60.1	2×0.8	60

表 5.6-20　　非金属护套钢带和铝带铠装参数参考表　　mm

铠装前假设直径	层数×厚度不小于		宽度不大于
	钢　带	铝　带	
≤15.0	2×0.2	2×0.5	20
15.1～25.0	2×0.2	2×0.5	25
25.1～35.0	2×0.5	2×0.5	30
35.1～50.0	2×0.5	2×0.5	35
50.1～70.0	2×0.5	2×0.5	45
≥70.0	2×0.8	2×0.8	60

表 5.6-21　金属和非金属护套的钢丝铠装参数参考表　mm

铠装前假设直径	细钢丝直径	粗钢丝直径
≤15.0	0.8～1.6	
15.1～25.0	1.6～2.0	
25.1～35.0	2.0～2.5	4.0～6.0
35.1～60.0	2.5～3.15	
>60.0	>3.15	

表 5.6-22　铠装层外护套厚度参考表　mm

护套前假设直径	包覆在金属套外	包覆在铠装层外
≤12.4	1.4	1.4
12.5～16.0	1.4	1.5
16.1～19.6	1.4	1.6
119.7～23.2	1.4	1.7
23.3～26.7	1.4	1.8
26.8～30.3	1.4	1.9
30.4～33.9	1.5	2.0
34.0～37.4	1.6	2.1
37.5～41.0	1.7	2.2
41.1～44.6	1.8	2.3
44.7～48.2	1.9	2.4
48.3～51.7	2.0	2.5
51.8～55.3	2.1	2.6
55.4～58.9	2.2	2.7
59.0～62.4	2.3	2.8
62.5～66.0	2.4	2.9
66.1～69.6	2.5	3.0
69.7～73.2	2.6	3.1
73.3～76.7	2.7	3.2
76.8～80.3	2.8	3.3
80.4～83.9	2.9	3.4
84.0～87.4	3.0	3.5
87.5～91.0	3.1	3.6
91.1～94.6	3.2	3.7
94.7～98.2	3.3	3.8
98.3～102.7	3.4	3.9

1.8　自承式结构

为了便于用户能直接架空敷设，将架空用的支撑钢绞线与电缆外护套挤包成一体，这种电线称为 8 字形自承式电缆，见图 5.6-5。有时也可将电缆卷绕在支撑钢线上；或将电缆与支撑钢绞线用螺旋形钢线捆扎在一起。国内较多采用 8 字形自承式结构。

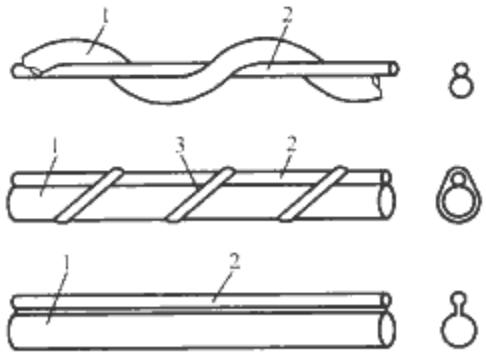


图 5.6-5　3 种自承式支撑钢绞线电缆结构
1—电缆；2—支撑钢绞线；3—螺旋形钢线

1.9　通信电缆常用性能参数的定义

本节仅列出少数常见的有关通信电缆的性能参数。

（1）电阻不平衡。线对两导体间或四线组中一对线两导体间的电阻不平衡定义为：

$$\Delta R = (R_{max} - R_{min})/(R_{max} + R_{min}) \times 100(\%) \quad (5.6\text{-}3)$$

式中：ΔR 为电阻不平衡，%；R_{max} 为较大电阻值的导体电阻，Ω；R_{min} 为较小电阻值的导体电阻，Ω。

（2）线对或四线组中一对线的对地电容不平衡。线对或四线组中一对线的对地电容不平衡的定义为：

$$\Delta C_e = C_1 - C_2 \quad (5.6\text{-}4)$$

式中：ΔC_e 为线对对地电容不平衡；C_1 为导体 a 与 b 间的电容，导体 b 应接所有其他导体及屏蔽与地；C_2 为导体 b 与 a 间的电容，导体 a 应接所有其他导体及屏蔽与地。

（3）线对或四线组中一对线的对屏蔽电容不平衡。线对或四线组中一对线的对屏蔽电容不平衡的定义为：

$$\Delta C_s = C_{1s} - C_{2s} \quad (5.6\text{-}5)$$

式中：ΔC_s 为线对对屏蔽电容不平衡；C_{1s} 为导体 a 与屏蔽间的电容，其余的导体应接平衡变量器的中性点；C_{2s} 为导体 b 与屏蔽间的电容，其余的导体应接平衡变量器的中性点。

（4）线对或四线组中一对线的工作电容。线对或四线组中一对线工作电容的计算式为：

$$C_m = [(C_1 + C_2)/2] - (C_3/4) \quad (5.6\text{-}6)$$

式中：C_m 为线对工作电容；C_1 为导体 a 与 b 间的电容，导体 b 应接所有其他导体及屏蔽与地；C_2 为导体 b 与 a 间的电容，导体 a 应接所有其他导体及屏蔽与地；C_3 为接在一起的被测线对与同时接地和接屏蔽的所有其他导体之间的电容。

（5）传播速度。传播速度的定义为信号在电缆中传播的速度，以 km/s 表示。由速度比和已知自由空间信号的传播速度得出信号在电缆中的传播速度。自由空间传播速度取 299 778km/s。

速度比定义为信号在电线中的传播速度与自由空间传播速度之比。

（6）衰减。当电缆阻抗与试验仪器阻抗匹配时，100m 长电缆的衰减定义为：

$$\alpha = (100/L) \times [10 \times \log_{10}(P_1/P_2)] \quad (5.6\text{-}7)$$

式中：α 为衰减常数，dB/100m；P_1 为负载阻抗等于信号源阻抗时的输入功率；P_2 为负载阻抗等于试验样品阻抗时的输出功率；L 为试验样品长度，m。

（7）近端串音衰减（NEXT）。近端串音衰减（NEXT）定义为：

$$[\text{NEXT}] = 10\log_{10}(P_{1N}/P_{2N})(\text{dB}) \quad (5.6\text{-}8)$$

式中：P_{1N} 为主串线对的输入功率；P_{2N} 为被串线对近端的串音输出功率。

（8）远端串音衰减（FEXT）。输入/输出端远端串音衰减（IO FEXT）定义为：

$$[\text{IO FEXT}] = 10\log_{10}(P_{1N}/P_{2F})(\text{dB}) \quad (5.6\text{-}9)$$

等电平远端串音衰减（EL FEXT）定义为：

$$[\text{EL FEXT}] = 10\log_{10}(P_{1F}/P_{2F})(\text{dB}) \quad (5.6\text{-}10)$$

式中：P_{1N} 为主串线对的输入功率；P_{1F} 为主串线对远端的输出功率；P_{2F} 为被串线对远端的串音输出功率。

等电平远端串音衰减(EL FEXT)与输入/输出端远端串音衰减(IO FEXT)之差等于主串线对的衰减。

（9）特性阻抗。规定频率下的特性阻抗 Z_c 定义为无限

长均匀线的输入阻抗。Z_∞ 是高频时特性阻抗的渐近值。

（10）表面转移阻抗。电气上短而纵向均匀的电缆屏蔽的表面转移阻抗 Z_T 定义为二次（内）回路上的纵向感应电压与一次（外）回路中通过的电流之比。

（11）传播时延。传播时延由测出的传播速度（V_t）按下式求出：

$$\text{传播时延} = 10^9/V_t \quad (\text{ns/km}) \qquad (5.6\text{-}11)$$

2 通信电缆的品种、规格和性能指标

从通信电缆的结构、用途、特性等方面来看，可分类成很多品种和规格。而从发展历史来看，近年来品种更新速度很快，不少品种已被淘汰。为此特从电缆的工作频率、传输距离、信号性质、设备配套和环境条件等因素，依次叙述每个品种的型号、名称、结构和特性。

2.1 市内通信电缆

市内通信电缆按绝缘分，有空气—纸绝缘和聚烯烃绝缘（实心和泡沫）二大系列。

2.1.1 纸绝缘（空气—纸绝缘）市内通信电缆

参考 JB/T 681—1999 标准，铜芯纸绝缘对绞市内通信电缆的型号和产品名称见表 5.6-23，其规格见表 5.6-24，主要技术指标见表 5.6-25。GB/T 14134—1993 标准中有 0.8mm 规格。

表 5.6-23 铜芯纸绝缘对绞市内通信电缆的型号和产品名称

型号	名 称
HQ	铜芯纸绝缘对绞裸铅套市内通信电缆
HQ02	铜芯纸绝缘对绞铅套聚氯乙烯护套市内通信电缆
HQ03	铜芯纸绝缘对绞铅套聚乙烯护套市内通信电缆
HQ22	铜芯纸绝缘对绞铅套钢带铠装聚氯乙烯护套市内通信电缆
HQ23	铜芯纸绝缘对绞铅套钢带铠装聚乙烯护套市内通信电缆
HQ32	铜芯纸绝缘对绞铅套细钢丝铠装聚氯乙烯护套市内通信电缆
HQ33	铜芯纸绝缘对绞铅套细钢丝铠装聚乙烯护套市内通信电缆
HQ41	铜芯纸绝缘对绞铅套粗钢丝铠装纤维外被市内通信电缆
HQ42	铜芯纸绝缘对绞铅套粗钢丝铠装聚氯乙烯护套市内通信电缆
HQ43	铜芯纸绝缘对绞铅套粗钢丝铠装聚乙烯护套市内通信电缆

表 5.6-24 铜芯纸绝缘对绞市内通信电缆的规格

型 号	导体直径（mm）				
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
	线芯对数（其中 0.8 为 GB/T 14134 数据）				
HQ	5～1800	5～1200	5～900	5～600	10～600
HQ02，HQ03	50～1200	20～900	20～600	20～400	10～300
HQ41	—	50～600	30～600	20～400	20～400
HQ22，HQ23	50～400	30～400	30～400	20～300	10～400
HQ32，HQ33，HQ42，HQ43	—	50～400	30～400	20～300	20～400

表 5.6-25 铜芯纸绝缘对绞市内通信电缆的主要技术指标

序号	试 验 项 目	指 标					
1	导体直流电阻（Ω/km）（20℃时）	导体直径（mm）	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
		最大值	148.0	95.0	65.8	48.0	36.6
2	绝缘电阻（MΩ·km）（20℃时）	每芯对其余线芯接地：最小值 2000					
3	耐电压试验 时间 2min	工频 500V 或直流 700V 不击穿					
4	工作电容 0.8kHz 或 1kHz/（nF/km） 标称平均值 最大平均值 最大值	 50 53 57					
5	线芯不应断线和混线	无断线混线					

2.1.2 聚烯烃绝缘市内通信电缆

聚烯烃绝缘市内通信电缆是当前最普遍应用的品种，综合其绝缘、护套和铠装，具有很多型号，但内部结构基本相同。参考 GB/T 13849—1991 和 YD/T 322—1996 标准，本节仅编入一些有代表性的产品，铠装部分的型号未编入，型号和名称参见表 5.6-26，规格见表 5.6-27，主要技术指标见表 5.6-28。

近端串音衰减，在频率为 1024kHz、电缆长度大于 0.3km 的条件下，对于非隔离式电缆（M—S）和隔离式电缆（M—S）的指标见表 5.6-29。

表 5.6-26 部分铜芯聚烯烃绝缘对绞市内通信电缆的型号和产品名称

型号	名 称
HYA	铜芯实心聚烯烃绝缘对绞铝塑粘结综合护套市内通信电缆
HYFA	铜芯泡沫聚烯烃绝缘对绞铝塑粘结综合护套市内通信电缆
HYPA	铜芯泡沫皮聚烯烃绝缘对绞铝塑粘结综合护套市内通信电缆
HYAT	铜芯实心聚烯烃绝缘填充式对绞铝塑粘结综合护套市内通信电缆
HYFAT	铜芯泡沫聚烯烃绝缘填充式对绞铝塑粘结综合护套市内通信电缆
HYPAT	铜芯泡沫皮聚烯烃绝缘填充式对绞铝塑粘结综合护套市内通信电缆

表 5.6-27　　铜芯聚烯烃绝缘对绞市内通信电缆的规格

聚烯烃绝缘型式	导体直径（mm）				
	0.32	0.4	0.5	0.6	0.8
	线芯对数				
实心型聚烯烃填充式	2000～3000	10～2000	10～1000	10～800	10～400
实心型聚烯烃非填充式	2000～4000	10～3000	10～1600	10～1000	10～600
泡沫和泡沫皮型聚烯烃填充式	2000～3600	10～2400	10～1600	10～1000	10～600
泡沫和泡沫皮型聚烯烃非填充式	2000～4000	10～3300	10～1800	10～1200	10～600

表 5.6-28　　铜芯聚烯烃绝缘对绞市内通信电缆的主要技术指标

序号	试验项目	指标					
1	导体直流电阻（Ω/km）（20℃时）	导体直径（mm）	0.32	0.4	0.5	0.6	0.8
		最大值	236.0	148.0	95.0	65.8	36.6
2	线对直流电阻不平衡（%）（20℃时）	导体直径（mm）	0.32	0.4	0.5	0.6	0.8
		平均值 ≤	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		最大值	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0
3	绝缘电阻（MΩ·km）（20℃时） 每芯对其余线芯接地及屏蔽	最小值	非填充式 10 000		填充式 3000		
4	耐直流电压试验（kV）		实心绝缘		泡沫和泡沫皮绝缘		
	施加电压时间		3s	1min	3s	1min	
	导体间：直径 0.32mm		2.0	1.0	1.0	0.5	
	直径 0.4mm 及以上		2.0	1.0	1.5	0.75	
	导体对屏蔽间		6.0	3.0	6.0	3.0	
	导体对隔离带间		5.0	2.5	5.0	2.5	
5	工作电容（nF/km） 0.8kHz 或 1kHz	标称线对数	10 对		>10 对		
		最大值	58.0		57.0		
		平均值	52.0±4.0		52.0±2.0		
6	工作电容差（%）（0.8kHz 或 1kHz） （100 对及以上填充式电缆）	2					
7	电容不平衡（pF/km）	标称线对数	10 对		>10 对		
	0.8kHz 或 1kHz	导体直径	≤0.5mm	>0.5mm	≤0.5mm	>0.5mm	
	线对与线对间电容不平衡	最大值	250	200	250	200	
	线对与地间电容不平衡	最大值	2630	2630	2630	2630	
	（平均值数据仅对实心绝缘作规定）	平均值 ≤	—	—	570	490	
8	10 对以上电缆 固有衰减（dB/km）（20℃时）平均值不大于	导体直径（mm）	0.32	0.4	0.5	0.6	0.8
	实心聚烯烃绝缘	150kHz	16.8	12.1	9.0	7.2	5.7
		1024kHz	33.5	27.3	22.5	18.5	13.7
	实心聚烯烃绝缘填充式	150kHz	16.0	11.7	8.20	6.7	4.7
		1024kHz	31.1	23.6	18.6	15.8	12.3
	泡沫和泡沫皮聚烯烃绝缘	150kHz	17.3	12.6	9.3	7.4	5.8
		1024kHz	36.0	29.3	24.1	19.8	14.6
	泡沫和泡沫皮聚烯烃绝缘填充式	150kHz	17.0	12.1	9.0	7.2	5.7
		1024kHz	32.9	26.5	21.8	18.0	13.3
	10 对电缆	平均值不大于 10 对以上同一型式电缆最大平均值的 110%					
9	远端串音防卫度（dB/km） 任意线对组合	非隔离式电缆（150kHz） 最小值　58			隔离式电缆（1024kHz） 最小值　41		
	基本单位内或 30 对电缆内线对间的全部组合	功率平均值不小于　69			功率平均值不小于　52		
	12 对、13 对子单位内或 10 对及 20 对电缆内线对的全部组合	功率平均值不小于　68			功率平均值不小于　51		
10	屏蔽铝带和高频隔离带的连续性	连　续					
11	线芯混线、断线	不混线、断线					

表 5.6-29 铜芯聚烯烃绝缘对绞市内通信电缆近端串音衰减 dB

电缆结构	有关规格和连接情况	指标
非隔离式电缆	10对电缆内线对间的全部组合	≥53
	12对、13对子单位内线对间的全部组合	≥54
	20对、30对电缆或基本单位内线对间的全部组合	≥54
	相邻12对、13对子单位间线对的全部组合	≥63
	相邻基本单位间线对的全部组合	≥64
	超单位内两个相对基本单位或子单位间线对的全部组合	≥70
	不同超单位内基本单位或子单位间线对的全部组合	≥79
隔离式电缆（国内几乎不使用）	10对电缆高频隔离带两侧线对间的全部组合	≥70
	20对电缆高频隔离带两侧线对间的全部组合	≥77
	30对电缆高频隔离带两侧线对间的全部组合	≥80
	50对及50对以上电缆高频隔离带两侧线对间的全部组合	≥84

2.2 长途对称通信电缆

我国过去大多数应用纸绝缘长途对称通信电缆，20世纪后期也发展了聚烯烃绝缘农村通信电缆，这二类高频对称通信电缆实际上现已淘汰。

2.2.1 铜芯纸绝缘星绞铅套高频对称通信电缆

参考JB/T 8661—1999铜芯纸绝缘星绞铅套高频对称通信电缆的型号和产品名称见表5.6-30，主要技术指标见表5.6-31。产品规格及结构可根据用户要求选择，基本范围描述如下：

（1）线组数为1，3，4和7个星绞组4种规格。

（2）频率为252kHz，156kHz和123kHz 3种。

（3）根据用户要求，电缆内可放置信号线2～6根。

（4）星绞组的导体直径为1.20mm软铜线。

（5）单线组信号线由直径0.60mm漆包线组成。多线组信号线直径为0.90mm，其中红、绿两根应为漆包线。

（6）线组导体绝缘，先缠绕纸绳，其外搭盖绕包1层纸带，搭盖不少于15%，若搭盖绕包2层纸带，搭盖不少于10%。纸带应分色明显。信号线除规定为漆包线外，其余为纸包绝缘。

2.2.2 铜芯聚烯烃绝缘星绞铅套高频对称通信电缆

参考GB 11326—1989标准，聚烯烃绝缘铝—聚烯烃粘结护套高频农村通信电缆的型号、名称和敷设场合见表5.6-32（非填充型）和表5.6-33（填充型）。电缆性能见表5.6-34。

表 5.6-30 铜芯纸绝缘星绞铅套高频对称通信电缆的型号和产品名称

型号	名 称
HEQ	铜芯纸绝缘星绞裸铅套高频对称通信电缆
HEQ02	铜芯纸绝缘星绞铅套聚氯乙烯护套高频对称通信电缆
HEQ03	铜芯纸绝缘星绞铅套聚乙烯护套高频对称通信电缆
HEQ22	铜芯纸绝缘星绞铅套钢带铠装聚氯乙烯护套高频对称通信电缆
HEQ23	铜芯纸绝缘星绞铅套钢带铠装聚乙烯护套高频对称通信电缆
HEQ32	铜芯纸绝缘星绞铅套细钢丝铠装聚氯乙烯护套高频对称通信电缆
HEQ33	铜芯纸绝缘星绞铅套细钢丝铠装聚乙烯护套高频对称通信电缆
HEQ41	铜芯纸绝缘星绞铅套粗钢丝铠装纤维外被高频对称通信电缆
HEQ42	铜芯纸绝缘星绞铅套粗钢丝铠装聚氯乙烯护套高频对称通信电缆
HEQ43	铜芯纸绝缘星绞铅套粗钢丝铠装聚乙烯护套高频对称通信电缆

表 5.6-31 铜芯纸绝缘星绞高频对称通信电缆的主要技术指标

序号	试验项目	单 位	指 标	试验方法	验收规则
1	导体直流电阻20℃时不大于 导体标称直径：0.6mm 0.9mm 1.2mm	Ω/km	 15.95 28.5 65.8	GB/T 3408.4	100%
	线对二导体电阻差与回路电阻之比不大于	—	1%		
2	绝缘电阻20℃时不小于 1）星绞组每芯对其余线芯接地 2）信号线芯：0.6mm 0.9mm	MΩ·km	 10 000 5000 2000	GB/T 3408.5或GB/T 3408.6	1.100%。 2. 抽验： 1）星绞组每组至少1根。 2）信号线每盘至少1根
3	工作电容 0.8kHz或1kHz 标称值：单组及钢丝铠装电缆 多组电缆 允许偏差	μF/km	 27.0 26.5 ±1.5	GB/T 5441.2	每盘抽2%，但不少于20对。 20对以下100%检验
4	近端串音衰减不小于 1）全频带 2）交货的50%以上电缆长度至少一端的全部数据	dB/850m	 59.1 62.5	GB/T 5441.2	100%
5	远端串音防卫度不小于 1）单组电缆全频带 2）多组电缆全频带 其中允许： a）7组电缆有9个数据，4组电缆有4个数据，3组电缆有9个数据。 b）10%交货电缆盘在a）项规定中有2个数据。	dB/850m	 68.6 73.8 68.6 67.7	GB/T 5441.6	100%

续表

序号	试验项目	单　位	指　标	试验方法	验收规则
6	电压试验（工频） 1）星绞组：2min 不击穿 a）全部线芯对铅套 b）芯对芯 2）信号线对星绞组连接铅套 2s	V	1800 1000 2000	GB/T 3408.14	100%

表 5.6-32　聚烯烃绝缘非填充型高频农村通信电缆的型号、名称表

型　号	名　称	敷　设
NHYAN—A(B，C)	铜芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	吊线架空
NHYFAN—A(B，C)	铜芯泡沫聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	
NHYPAN—A(B，C)	铜芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	
NHYSAN—A(B，C)	铜芯绳管聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	
NHLYAN—A(B，C)	铝芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	
NHLYFAN—A(B，C)	铝芯泡沫聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	
NHLYPAN—A(B，C)	铝芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	
NHLYSAN—A(B，C)	铝芯绳管聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	

表 5.6-33　聚烯烃绝缘填充型高频农村通信电缆的型号、名称表

型　号	名　称	敷设场合
NHYATN—A(B，C)	铜芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型 123(156，252)kHz 农村通信电缆	管道或沟渠
NHYATN33—A(B，C)	铜芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套填充型单层细圆钢丝铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	水线
NHYATN41—A(B，C)	铜芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套填充型单层粗圆钢丝铠装纤维外被 123(156，252)kHz 农村通信电缆	大拉力水线
NHYATN43—A(B，C)	铜芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套铝—聚烯烃粘结护套填充型单层粗圆钢丝铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	大拉力水线
NHYATN23—A(B，C)	铜芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型钢带铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHYATN53—A(B，C)	铜芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型单层钢带纵包铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHYATN553—A(B，C)	铜芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型双层钢带纵包铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHYPATN—A(B，C)	铜芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型 123(156，252)kHz 农村通信电缆	管道或沟渠
NHYPATN23—A(B，C)	铜芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型钢带铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHYPATN53—A(B，C)	铜芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型单层钢带纵包铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHYPATN553—A(B，C)	铜芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型双层钢带纵包铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHLYATN—A(B，C)	铝芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型 123(156，252)kHz 农村通信电缆	管道或沟渠
NHLYATN23—A(B，C)	铝芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型钢带铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHLYATN53—A(B，C)	铝芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型单层钢带纵包铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHLYATN553—A(B，C)	铝芯实心聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型双层钢带纵包铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHLYPATN—A(B，C)	铝芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型 123(156，252)kHz 农村通信电缆	管道或沟渠
NHLYPATN23—A(B，C)	铝芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型钢带铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHLYPATN53—A(B，C)	铝芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型单层钢带纵包铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地
NHLYPATN553—A(B，C)	铝芯泡沫皮聚烯烃绝缘聚烯烃内护套(缆芯包带)铝—聚烯烃粘结护套填充型双层钢带纵包铠装聚乙烯护套 123(156，252)kHz 农村通信电缆	埋地

表 5.6-34　　聚烯烃绝缘非填充型(含填充型)高频农村通信电缆的性能指标

项　目	指　标	长度换算公式
一、高频星绞四线组		
20℃时导线直流电阻(Ω/km)不大于		
每根铜导线	15.95	
每根铝导线	15.00	$L/1000$
工作对导线电阻不平衡(%)不大于	1	
20℃时绝缘电阻(MΩ·km)不小于		
每根导线对其余和屏蔽相连的导线：非填充型	10 000	$1000/L$
填充型	5000	
工作电容 0.8～1kHz/(nF/km)		
标称值：铜芯非填充型绳管绝缘电缆	26	
铜芯非填充型其他绝缘电缆	28	
铜芯填充型电缆	35	$L/1000$
铝芯非填充型电缆	31	
铝芯填充型电缆	39	
允许偏差：	±1.5	
电容耦合和对地电容不平衡 0.8～1kHz、(pF/km)不大于		
K_2，K_3平均值	435	
最大值	1740	$[L/1000+(L/1000)^{1/2}]/2$
E_1，E_2平均值	435	
最大值	1740	
绝缘介电强度：工频(或直流)(V)2min　不击穿		
导线之间	1800(2500)	
导线对屏蔽(无内护套)	1800(2500)	
导线对屏蔽(有内护套)	7000(10 000)	
串音(dB/km)不小于		
近端串音衰减　全频带		
全部数据	59	
交货中 50%以上电缆长度至少有一端的全部数据	62	$-10\lg(L/1000)$
远端串音防卫度　最高传输频率		
四线组内	68	
四线组间	73	
20℃时固有衰减　(dB/km)不大于		
123kHz	2.17	$L/1000$
156kHz	2.40	
252kHz	2.90	
二、低频对绞线对		
20℃时导线直流电阻(Ω/km)不大于		
每根铜导线	48.00	$L/1000$
线对导线电阻不平衡(%)不大于	1	
线对工作电容 0.8～1kHz(nF/km)不大于	56	$L/1000$
20℃时绝缘电阻(MΩ·km)不小于		
每根导线对其余和屏蔽相连的导线	5000	$1000/L$
三、屏蔽		
20℃时铝带直流电阻(Ω/km)不大于		
不轧纹铝带：标称厚度 0.20(或 0.15)mm	150(200)	$L/1000$
轧纹铝带：标称厚度 0.20(或 0.15)mm	168(224)	
导通直流试验电压(V)不大于	36	

2.3　电话用户通信线

电话用户通信线主要包括 2 种产品，即聚烯烃绝缘聚氯乙烯护套平行 2 芯铜包钢电话用户通信线和电话网用户铜芯室内线。

2.3.1　聚烯烃绝缘聚氯乙烯护套平行 2 芯铜包钢电话用户通信线

参考 YD/T 722—1994 标准，聚烯烃绝缘聚氯乙烯护套平行 2 芯铜包钢电话用户通信线，适用于通信用户终端设备到电缆分线箱（盒）之间的室外引入线及室内敷设的用户通信线，其规格和性能见表 5.6-35 和表 5.6-36。

2.3.2　电话网用户铜芯室内线

参考 YD/T 840—1996，电话网用户铜芯室内线适用于室内布线。该产品有聚氯乙烯、聚乙烯和阻燃聚乙烯绝缘 3 种，其规格和性能见表5.6-37和表 5.6-38。

表 5.6-35　聚烯烃绝缘聚氯乙烯护套平行 2 芯铜包钢电话用户通信线规格

规　格	芯线直径 (mm)	电导率 (%)	断裂负荷等级
HBGTYV2×1/1.0—20[(Ⅱ,Ⅲ)]	1.0(−0.01～+0.02)	20	Ⅰ(Ⅱ,Ⅲ)
HBGTYV2×1/1.0—30[(Ⅱ,Ⅲ)]	1.0(−0.01～+0.02)	30	Ⅰ(Ⅱ,Ⅲ)
HBGTYV2×1/1.0—40[(Ⅱ,Ⅲ)]	1.0(−0.01～+0.02)	40	Ⅰ(Ⅱ,Ⅲ)
HBGTYV2×1/1.2—20[(Ⅱ,Ⅲ)]	1.2(−0.01～+0.03)	20	Ⅰ(Ⅱ,Ⅲ)
HBGTYV2×1/1.2—30[(Ⅱ,Ⅲ)]	1.2(−0.01～+0.03)	30	Ⅰ(Ⅱ,Ⅲ)
HBGTYV2×1/1.2—40[(Ⅱ,Ⅲ)]	1.2(−0.01～+0.03)	40	Ⅰ(Ⅱ,Ⅲ)

表 5.6-36　聚烯烃绝缘聚氯乙烯护套平行 2 芯铜包钢电话用户通信线性能

规　格	直流电阻 (Ω/km) (20℃)	绝缘电阻 (MΩ·km) (20℃)	工作电容 (nF/km)	导线电阻不平衡	介电强度 (不击穿)
HBGTYV2×1/1.0—20[(Ⅱ,Ⅲ)]	≤107	≥10 000	43±2	≤4.5%	直流 1500V 或工频 1000V
HBGTYV2×1/1.0—30[(Ⅱ,Ⅲ)]	≤72	≥10 000	43±2	≤4.5%	
HBGTYV2×1/1.0—40[(Ⅱ,Ⅲ)]	≤54	≥10 000	43±2	≤4.5%	
HBGTYV2×1/1.2—20[(Ⅱ,Ⅲ)]	≤64	≥10 000	46±2	≤4.5%	
HBGTYV2×1/1.2—30[(Ⅱ,Ⅲ)]	≤54	≥10 000	46±2	≤4.5%	
HBGTYV2×1/1.2—40[(Ⅱ,Ⅲ)]	≤38	≥10 000	46±2	≤4.5%	

表 5.6-37　电话网用户铜芯室内线的规格

型号	名　称	使用环境
HBV	聚氯乙烯绝缘平行线对室内线	一般环境
HBV—J	聚氯乙烯绝缘绞合线对室内线	
HBZR	阻燃聚乙烯平行线对室内线	
HBZR—J	阻燃聚乙烯绞合线对室内线	
HBVV	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套平行线对室内线	较严酷环境
HBVV—J	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套绞合线对室内线	
HBYV	聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套平行线对室内线	
HBYV—J	聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套绞合线对室内线	

表 5.6-38　电话网用户铜芯室内线的性能指标

序号	试验项目	性能指标
1	绝缘收缩率	不大于 5%
2	绝缘冷弯曲	不开裂

续表

序号	试验项目	性能指标		
3	绝缘热冲击	不开裂		
4	护套热冲击	不开裂		
5	不延燃性	火焰移开后 30s 内熄灭		
6	20℃时导体直流电阻 (Ω/km)	0.50mm	0.60mm	0.80mm
		95.0	65.8	36.6
7	20℃时导体直流电阻不平衡	不大于 5%		
8	绝缘介电强度	直流 1500V 或工频 1000V		
9	20℃时绝缘电阻 (MΩ·km)	聚乙烯和阻燃聚乙烯		聚氯乙烯
		≥5000		≥200
10	导体断线及混线	不断线及不混线		

2.3.3　电话软绳和软线

电话软线适用于连接电话机与送受话器或接线盒，需具有高度移动和弯曲性能，以保证使用寿命。参考 GB 11016—1989 标准，聚氯乙烯绝缘电话软线型号、用途和尺寸见表 5.6-39 和表 5.6-40。聚丙烯绝缘聚氯乙烯护套扁形弹簧形电话软线和聚丙乙烯绝缘聚氯乙烯护套扁形电话软线的型号、用途和尺寸见表 5.6-41 和表 5.6-42。橡皮绝缘纤维编织电话软线等产品的型号尺寸和用途见表 5.6-43 和表 5.6-44。

表 5.6-39　聚氯乙烯绝缘电话软线型号、名称和用途

型　号	产　品　名　称	用　途
HRV	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套电话软线	连接电话机机座与接线盒
HRVB	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套扁形电话软线	连接电话机机座与接线盒
HRVT	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套弹簧形电话软线	连接电话机机座与电话机手柄

表 5.6-40　聚氯乙烯绝缘电话软线规格和尺寸

型　号	外径和外形尺寸(mm)			
	2 芯	3 芯	4 芯	5 芯
HRV	4.3±0.2	4.5±0.2	5.1±0.3	—
HRVB	(3.0±0.2)×(4.3±0.2)	—	—	—
HRVT	—	4.5±0.2	5.1±0.3	5.6±0.3

表 5.6-41　聚丙烯绝缘电话软线型号、名称和用途

型　号	产　品　名　称	用　途
HRBBT	聚丙烯绝缘聚氯乙烯护套扁形弹簧形电话软线	连接电话机机座与电话机手柄
HRBB	聚丙乙烯绝缘聚氯乙烯护套扁形电话软线	连接电话机机座与接线盒

表 5.6-42　聚丙烯绝缘电话软线规格和尺寸

型　号	外径和外形尺寸(mm)		
	2 芯	4 芯	6 芯
HRBBT	(2.60±0.20)×(4.00±0.2)	—	—
HRBB	(2.50±0.20)×(5.00±0.2)	(2.50±0.15)×(5.00±0.2)	(2.70±0.15)×(6.80±0.2)

表 5.6-43 橡皮绝缘电话软线型号、名称和用途

型号	产品名称	用 途
HR	橡皮绝缘纤维编织电话软线	连接电话机机座与电话机手柄或接线盒
HRH	橡皮绝缘相扑护套电话软线	连接电话机机座与电话机手柄(防水、防爆)
HRE	橡皮绝缘纤维编织耳机软线	连接话务员耳机
HRJ	橡皮绝缘纤维编织交换机插塞软线	连接交换机与插塞

表 5.6-44 橡皮绝缘电话软线规格和尺寸

型 号	外径和外形尺寸(mm)			
	2芯	3芯	4芯	5芯
HR	5.8	6.1	6.7	7.4
HRH	7.4	7.8	8.3	—
HRE	5.8	—	6.7	—
HRJ	5.8	6.1	—	—

2.4 电信设备装置用通信电线电缆

电信设备装置用通信电线电缆适用于交换机及其他传输设备、电话和电报设备、数据处理设备的互相连接。其中高频局用对称电缆适用于明线超12路、超24路、高12路、12路、3路载波通信局内，作高频分线盒至引入试验架，引入试验架至通信设备间的连接线。

(1) 聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套局用电缆。参考GB 11327.2—1989标准，聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套局用电缆的型号和名称见表5.6-45，规格见表5.6-46。电气性能见表5.6-47。

(2) 聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套低频通信配线电缆。聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套低频通信配线电缆的型号和规格见表5.6-48。

(3) 铜芯聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套高频局用对称电缆。该产品用于明线超12路、超24路、高12路、12路、3路载波通信局内，作高频分线盒至引入试验架及引入试验架至通信设备间的连接线。参考YD/T 530—1992标准，电缆型号为HJYVP，允许使用温度为－25～65℃，允许弯曲半径不小于电缆直径的10倍，使用频率范围为5～530kHz。电缆规格和尺寸见表5.6-49，电气性能要求见表5.6-50。

表 5.6-45 局用电缆的型号和名称

型 号	名 称
HJVV	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套局用电缆
HJVVP	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套屏蔽型局用电缆

表 5.6-46 局用电缆的规格及绝缘厚度

电缆型号	导体标称直径(mm)			
	0.4	0.5	0.6	0.8
HJVV HJVVP	对线组、三线组、四线组、五线组的组数范围 5～200 绝缘厚度 ≥0.15mm	对线组、三线组、四线组、五线组的组数范围 5～200 绝缘厚度 ≥0.15mm	对线组、三线组、四线组、五线组的组数范围 5～200 绝缘厚度 ≥0.15mm	对线组、三线组、四线组、五线组的组数范围 5～160 绝缘厚度 ≥0.25mm

注 缆芯绞合形式有同心层绞合和单位式绞合，色谱需按GB 11327.2—1989标准排列。

表 5.6-47 局用电缆的电气性能指标

试 验 项 目	性 能 指 标	
20℃时导体的直流电阻： 导体直径：0.4mm	最大值≤150.0Ω/km	平均值≤144.0Ω/km
0.5mm	最大值≤95.9Ω/km	平均值≤92.1Ω/km
0.6mm	最大值≤66.6Ω/km	平均值≤63.9Ω/km
0.8mtn	最大值≤36.8Ω/km	平均值≤35.3Ω/km
绝缘介电强度 1min 不击穿	0.4～0.6mm 规格：工频 1000V 或直流 1500V 0.8mtn 规格：工频 1500V 或直流 2250V	
20℃时绝缘电阻（MΩ·km）	大于 200	
工作电容（μF/km）	不大于 0.12	
电容不平衡（pF/km）	不大于 800	

表 5.6-48 低频通信配线电缆的型号和规格

型 号	导体标称直径（mm）			
	0.4	0.5	0.6	0.8
	配线电缆标称成缆元件（对线组）数			
HPVV	10～600	10～600	10～600	10～400

注 1. 电缆标称成缆元件数系列为：10，20，30，50，100，200，300，400，600。

2. 电缆的电气性能指标与表5.6-47相同。

表 5.6-49 高频局用对称电缆规格和尺寸

芯数×根数/直径（mm）	导体标称直径（mm）	绝缘标称外径（mm）	护套厚度（mm）		电缆最大外径（mm）
			最大值	标称值	
2×1/0.51	0.51	2.74	0.8	1.0	10.0

表 5.6-50 高频局用对称电缆电气性能要求

序号	试 验 项 目	单 位	指 标
1	20℃时导体直流电阻	Ω/km	≤90
2	20℃时绝缘电阻	MΩ·km	≥5000
3	线对工作电容	μF/km	≤0.032
4	绝缘介电强度（芯对芯，芯对屏）50Hz 2min	kV	≥1.0
5	特性阻抗：36kHz 150kHz 530kHz	Ω	200±10 170±8 170±8
6	20℃时衰减常数：530kHz	dB/100m	≤1.0
7	近端串音衰减：5kHz≤f≤150kHz 150kHz<f≤324kHz 324kHz<f≤530kHz	dB/100m	≥101 ≥112 ≥116

2.5 同轴综合通信电缆

同轴综合通信电缆的结构中包括同轴对、高频四线组、高频对线组、低频四线组、低频对线组、信号四线组、信号对线组以及信号线等。1.2/4.4mm小同轴综合通信电缆主要用于长途通信干线路，是GB/T 4011—1983保留产品，同轴对用于22MHz及以下模拟通信传输或34Mbit/s及以下数字通信传输。其结构组成见表5.6-51，同轴对在各频率范

围内的特性阻抗平均值见表 5.6-52，衰减常数见表 5.6-53，性能指标见表 5.6-54。2.6/9.4mm 中同轴电缆适用于传输电报、新闻等传真，播送黑白及彩色电视，并可进行城市间长途电话自动拨号等通信传输。该类产品中保留产品的型号、名称见表 5.6-55，具体结构、性能略。新建线路已用光纤取代同轴对。

表 5.6-51　　1.2/4.4mm 同轴综合通信电缆结构

组合元件名称		序号和数量									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
同轴对 1.2/4.4mm		4						6			8
高频四线组 4×0.9mm		3	4		3	4		—		4	1
高频对线组 2×0.7mm		—						4		—	
低频四线组	4×0.9mm	—	9		12	13		1		11	1
	4×0.6mm	—		4	—						
低频对线组	2×0.7mm	—						2	—		
	2×0.6mm	—		5	—		10	—		15	—
信号四线组 4×0.6mm		—	4	—							2
信号对线组 2×0.6mm		—				10	—				8
信号线	1×0.9mm	—	5	—	4	—					
	1×0.6mm	6	—		6	—		4		—	

表 5.6-52　　1.2/4.4mm 同轴综合通信电缆频率特性阻抗平均值

频率（MHz）	0.06	0.1	0.2	0.5	1.0	1.3	4.5	12	18
阻抗（Ω）	79.8	78.9	77.4	75.8	75.0	74.8	74.0	73.6	73.5

表 5.6-53　　1.2/4.4mm 同轴综合通信电缆衰减常数

频率（MHz）	0.05	0.1	0.3	0.5	1.0	1.3	4.5	12	18	22
标称值（dB/km）	1.54	1.84	2.96	3.77	5.41	6.12	11.22	18.36	22.44	24.80
偏差（dB/km）	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2
温度系数×1/1000	2.52	2.35	2.10	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

表 5.6-54　　1.2/4.4mm 同轴综合通信电缆性能指标

序　号	项　　目	单　位	指　标
1	20℃时内导体直流电阻	Ω/km	≤16.0
2	特性阻抗（1MHz）	Ω	75±0.75
3	端阻抗（1MHz） 允许偏差：用于 0.06～6MHz 传输系统 用于 0.3～22MHz 或 34Mbit/s 传输系统 A、B 端阻抗差：用于 0.06～6MHz 传输系统 用于 0.3～22MHz 或 34Mbit/s 传输系统	Ω	75 ±0.75 ±0.50 ≤0.70 ≤0.50
4	阻抗不均匀性 用于 0.06～6MHz 传输系统：100% 80% 用于 0.3～22MHz 或 34Mbit/s 传输系统：100% 95%	‰（dB）	≤4.0 ≤2.5 ≤3.0 ≤2.0
	3 个最大不均匀性的平均值 用于 0.06～6MHz 传输系统 用于 0.3～22MHz 或 34Mbit/s 传输系统	‰（dB）	≤3.5 ≤2.8

表 5.6-55　　2.6/9.4mm 同轴综合通信电缆型号、名称

型　号	产　品　名　称
HOL	裸铅套同轴综合通信电缆
HOL02	铅套聚氯乙烯护套同轴综合通信电缆
HOL03	铅套聚乙烯护套同轴综合通信电缆
HOL22	铅套钢带铠装聚氯乙烯套同轴综合通信电缆
HOL23	铅套钢带铠装聚乙烯套同轴综合通信电缆
HOL32	铅套钢丝铠装聚氯乙烯套同轴综合通信电缆
HOL33	铅套钢丝铠装聚乙烯护套同轴综合通信电缆
HOQ	裸铅套同轴综合通信电缆
HOQ02	铅套聚氯乙烯护套同轴综合通信电缆

续表

型　号	产　品　名　称
HOQ03	铅套聚乙烯护套同轴综合通信电缆
HOQ21	铅套钢带铠装纤维外被同轴综合通信电缆
HOQ22	铅套钢带铠装聚氯乙烯套同轴综合通信电缆
HOQ23	铅套钢带铠装聚乙烯护套同轴综合通信电缆
HOQ31	铅套钢丝铠装纤维外被同轴综合通信电缆
HOQ32	铅套钢丝铠装聚氯乙烯套同轴综合通信电缆
HOQ33	铅套钢丝铠装聚乙烯护套同轴综合通信电缆
HOQ41	铅套粗钢丝铠装纤维外被同轴综合通信电缆
HOQ42	铅套粗钢丝铠装聚氯乙烯套同轴综合通信电缆
HOQ43	铅套粗钢丝铠装聚乙烯套同轴综合通信电缆

2.6 射频电缆（同轴型）

2.6.1 接入网用户同轴电缆（引入线）

接入网用户同轴电缆（引入线），在光缆与同轴电缆混合网系统（HFC网络）中，连接光线路设备至用户接口之间的同轴电缆，主要用于宽带、兼容多功能公用网络中传输数据、电视、电话和计算机信号等通信业务，工作频率5～1000MHz。参考YD/T 897.1—1997及其他企业标准，接入网用户同轴电缆的型号、尺寸和重量见表5.6-56，性能指标见表5.6-57和表5.6-58。

表5.6-56 接入网用户同轴电缆的型号、尺寸和重量

产品型号	内导体直径 (mm)	电缆外径 (mm)	计算重量 (kg/km)	标准长度 (m)
HCSV/Y—75—59	0.81	6.10	31	100
HCTV/Y—75—59		6.20	34	
HCQV/Y—75—59		6.73	36	
HCSV/Y—75—6	1.02	6.90	39	100
HCTV/Y—75—6		7.06	43	
HCQV/Y—75—6		7.54	44	
HCSV/Y—75—7	1.29	8.10	50	300
HCTV/Y—75—7		8.20	54	
HCQV/Y—75—7		8.64	55	
HCSV/Y—75—11	1.63	10.16	81	1000
HCTV/Y—75—11		10.16	83	
HCQV/Y—75—11		10.34	88	

表5.6-57 接入网用户同轴电缆的性能指标(1)

项目		HCSV/Y—75—59 标准屏蔽	HCTV/Y—75—59 3层屏蔽	HCQV/Y—75—59 4层屏蔽	HCSV/Y—75—6 标准屏蔽	HCTV/Y—75—6 3层屏蔽	HCQV/Y—75—6 4层屏蔽
内导体直径 (mm)		0.81			1.02		
介质绝缘直径 (mm)		3.66			4.57		
缆芯外径 (mm)		3.86			4.78		
护套外径 (mm)		6.10	6.20	6.73	6.90	7.06	7.54
阻抗特性 (Ω)		75					
屏蔽衰减 (dB)	55/MHz	≥63					
	300/MHz	≥78					
	100/MHz	≥80					
回波损耗 (dB)	VHF	20					
	UHF	20					
衰减常数 (dB/100m) (20℃时)	5/MHz	4.00			2.66		
	55/MHz	6.76			5.25		
	211/MHz	12.93			10.10		
	270/MHz	14.76			11.48		
	300/MHz	15.49			12.14		
	330/MHz	16.27			12.76		
	400/MHz	17.98			14.11		
	450/MHz	19.13			15.03		
	550/MHz	21.23			16.70		
	750/MHz	25.00			19.69		
	870/MHz	27.03			21.33		
	1000/MHz	29.10			22.97		

表5.6-58 接入网用户同轴电缆的性能指标(2)

项目		HCSV/Y—75—7 标准屏蔽	HCTV/Y—75—7 3层屏蔽	HCQV/Y—75—7 4层屏蔽	HCSV/Y—75—11 标准屏蔽	HCTV/Y—75—11 3层屏蔽	HCQV/Y—75—11 4层屏蔽
内导体直径 (mm)		1.29			1.63		
介质绝缘直径 (mm)		5.72			7.11		
缆芯外径 (mm)		5.92			7.32		
护套外径 (mm)		8.10	8.20	8.64	10.16	10.16	10.34
阻抗特性 (Ω)		75					
屏蔽衰减 (dB)	55/MHz	≥63					
	300/MHz	≥78					
	100/MHz	≥80					
回波损耗 (dB)	VHF	≥20					
	UHF	≥20					
衰减常数 (dB/100m) (20℃时)	5/MHz	1.87			1.25		
	55/MHz	4.17			3.38		
	211/MHz	8.04			6.59		
	270/MHz	9.15			7.55		
	300/MHz	9.68			7.97		
	330/MHz	10.17			8.37		
	400/MHz	11.25			9.28		
	450/MHz	12.01			9.91		
	550/MHz	13.35			11.02		
	750/MHz	15.78			13.09		
	870/MHz	17.09			14.21		
	1000/MHz	18.44			15.32		

2.6.2 接入网用同轴配线电缆

接入网用同轴配线电缆主要用于将光线路设备连接到建筑群、建筑物通信设备之间，作为通信或有线电视干线，用于传输电话、电视和数据等通信业务。电缆的工作频率范围为：5～1000MHz。电缆的使用温度一般为－40～60℃。参考YD/T 897.2—1998标准，电缆型号由型式代号和规格代号组成。型式代号见表5.6-59，规格代号见表5.6-60。电缆的结构代号见表5.6-61。电缆的其他参数和性能见表5.6-62～表5.6-67。

表 5.6-59　　接入网用同轴配线电缆的型式代号

分　类		内导体和外导体材料		护　套	内护套	自承式		外护层		特性阻抗	
代　号	含　义	代　号	含　义	代　号	含　义	代　号	含　义	代　号	含　义	代　号	含　义
H	通信电缆	CA	铜包铝内导体铝外导体	Y	聚乙烯护套	C	自承式电缆	53	皱纹钢带纵包聚乙烯外护套	75	标称特性阻抗 75Ω
								75	单层绕包钢带聚乙烯外护套		

表 5.6-60　　接入网用同轴配线电缆的型式代号的主要使用场合

类　型	无外护套电缆	自承式电缆	有外护套电缆	
			单层皱纹钢带纵包	单层钢带搭盖绕包
型　号	HCAY—75	HCAYC—75	HCAY53—75	HCAY73—75
主要使用场合	室内架空	架　空	管道、埋地或要求防鼠	

表 5.6-61　　接入网用同轴配线电缆的结构代号

规格代号	内导体尺寸(mm)		外导体尺寸(mm)					绝缘结构
	标称直径	偏　差	标称内径	标称厚度	厚度偏差	标称外径	外径偏差	
412—F	2.24	±0.03	9.19	0.64	±0.03	10.46	±0.05	闭孔结构聚乙烯
440—D	2.67	±0.03	10.41	0.51	±0.03	11.43	±0.05	聚乙烯垫片外包聚乙烯管
500—F	2.77	±0.03	11.43	0.64	±0.03	12.70	±0.05	闭孔结构聚乙烯
500—D	3.12	±0.03	11.94	0.51	±0.03	12.95	±0.05	聚乙烯垫片外包聚乙烯管
540—F	3.15	±0.03	13.03	0.34	±0.03	13.72	±0.05	闭孔结构聚乙烯
565—F	3.28	±0.03	13.18	0.58	±0.03	14.35	±0.05	闭孔结构聚乙烯
625—F	3.45	±0.03	14.30	0.79	±0.04	15.88	±0.05	闭孔结构聚乙烯
650—D	3.96	±0.03	15.24	0.51	±0.03	16.26	±0.05	聚乙烯垫片外包聚乙烯管
700—F	4.14	±0.03	16.59	0.64	±0.03	17.86	±0.05	闭孔结构聚乙烯
715—F	4.22	±0.03	17.42	0.38	±0.03	18.16	±0.05	闭孔结构聚乙烯
750—F	4.22	±0.03	17.22	0.91	±0.04	19.05	±0.05	闭孔结构聚乙烯
750—D	4.70	±0.03	18.08	0.61	±0.03	19.30	±0.05	聚乙烯垫片外包聚乙烯管
840—F	4.93	±0.03	19.81	0.76	±0.04	21.34	±0.05	闭孔结构聚乙烯
860—F	5.16	±0.03	21.03	0.41	±0.03	21.84	±0.05	闭孔结构聚乙烯
875—F	4.93	±0.03	20.24	0.59	±0.04	22.23	±0.05	闭孔结构聚乙烯
1000—F	5.59	±0.03	22.61	1.40	±0.05	25.40	±0.05	闭孔结构聚乙烯
1000—D	6.30	±0.03	24.46	0.66	±0.03	25.78	±0.05	聚乙烯垫片外包聚乙烯管
1125—F	6.68	±0.03	27.46	0.56	±0.03	28.58	±0.05	闭孔结构聚乙烯
1160—F	6.83	±0.03	26.97	1.24	±0.05	29.46	±0.05	闭孔结构聚乙烯

表 5.6-62　　接入网用同轴配线内导体直径

规格代号	412—F	440—D	500—F	500—D	540—F	565—F	625—F	650—D	700—F	715—F
标称直径(mm)	2.24	2.67	2.77	3.12	3.15	3.28	3.45	3.96	4.14	4.22
规格代号	750—F	750—D	840—F	860—F	875—F	1000—F	1000—D	1125—F	1160—F	—
标称直径(mm)	4.22	4.70	4.93	5.16	4.93	5.59	6.30	6.68	6.83	—

注　要求直径偏差：±0.03mm；抗张强度：≤138MPa；断裂伸长率：≥15%。

表 5.6-63　　接入网用同轴配线电缆外导体尺寸　　mm

规格代号	标称内径	外　径		标称厚度及偏差
		标称值	偏差	
412—F	9.19	10.46	±0.05	0.64±0.03
440—D	10.41	11.43		0.51±0.03
500—F	11.43	12.70	±0.05	0.64±0.03
500—D	11.94	12.95		0.51±0.03
540—F	13.03	13.72		0.34±0.03
565—F	13.18	14.35		0.58±0.03

续表

规格代号	标称内径	外径		标称厚度及偏差
		标称值	偏差	
625—F	14.30	15.88	±0.05	0.79±0.04
650—D	15.24	16.26		0.51±0.03
700—F	16.59	17.86	±0.05	0.64±0.03
715—F	17.42	18.16		0.38±0.03
750—F	17.22	19.05		0.91±0.04
750—D	18.08	19.30		0.61±0.03
840—F	19.81	21.34	±0.05	0.76±0.04
860—F	21.03	21.84		0.41±0.03
875—F	20.24	22.23		0.99±0.04
1000—F	22.61	25.40	±0.05	1.40±0.05
1000—D	24.46	25.78		0.66±0.03
1125—F	27.46	28.58		0.56±0.03
1160—F	26.97	29.46		1.24±0.05

表 5.6-64　　接入网用同轴配线电缆护套标称外径　　mm

规格代号	架空电缆	直埋式电缆	自承式电缆	防鼠铝装电组		
				内护套	53型护层	73型护层
412—F	11.9	12.2	12.2	12.2	16.3	15.3
440—D	13.3	13.8	13.3	13.3	17.3	16.4
500—F	14.2	14.5	14.7	14.2	18.2	17.5
500—D	14.9	15.4	14.9	14.9	19.0	18.0
540—F	15.5	15.5	15.8	15.5	19.4	18.3
565—F	15.9	16.1	16.4	15.9	20.3	19.2
625—F	17.4	17.7	17.9	17.4	21.5	20.4
650—D	18.2	18.7	18.9	18.2	22.6	21.2
700—F	19.7	19.7	19.9	19.7	23.9	22.6
715—F	19.9	19.9	20.1	19.9	23.9	25.5
750—F	20.8	21.1	21.6	20.8	24.8	23.3
750—D	21.7	21.7	21.7	21.7	26.3	25.0
840—F	23.1	23.4	23.9	23.1	27.6	26.3
860—F	24.4	24.4	24.6	24.4	28.5	27.2
875—F	24.4	24.4	24.8	24.4	28.5	27.2
1000—F	27.4	27.7	28.6	27.4	31.6	30.3
1000—D	28.2	28.2	28.6	28.2	33.0	31.7
1125—F	31.2	31.5	31.7	31.2	35.4	34.0
1160—F	32.1	32.5	32.7	32.1	36.8	35.4

表 5.6-65　　电缆护套最小厚度(t_1)和最小平均厚度(t_2)　　mm

规格代号	架空电缆 t_1/t_2	直埋式电缆 t_1/t_2	自承式电缆 t_1/t_2	防鼠铝装电缆 t_1/t_2		
				内护套	53型护层	73型护层
412—F	0.51/0.64	0.51/0.64	0.61/0.73	0.51/0.64	0.89/1.08	0.89/1.08
440—D	0.53/0.65	0.71/0.86	0.53/0.65	0.53/0.65	0.80/0.97	0.80/0.97
500—F	0.53/0.65	0.71/0.86	0.71/0.86	0.53/0.65	0.89/1.08	0.89/1.08
500—D	0.53/0.65	0.71/0.86	0.53/0.65	0.53/0.65	0.80/0.97	0.80/0.97
540—F	0.53/0.65	0.71/0.86	0.53/0.65	0.53/0.65	0.71/0.86	0.71/0.86
565—F	0.53/0.65	0.71/0.86	0.53/0.65	0.53/0.65	0.89/1.08	0.89/1.08
625—F	0.53/0.65	0.71/0.86	0.71/0.86	0.53/0.65	0.89/1.08	0.89/1.08
650—D	0.53/0.65	0.71/0.86	0.53/0.65	0.53/0.65	0.85/1.04	0.85/1.04

续表

规格代号	架空电缆 t_1/t_2	直埋式电缆 t_1/t_2	自承式电缆 t_1/t_2	防鼠铝装电缆 t_1/t_2		
				内护套	53 型护层	73 型护层
700—F	0.64/0.76	0.64/0.76	0.89/0.97	0.64/0.76	0.89/0.97	0.89/1.08
715—F	0.64/0.76	0.64/0.76	0.64/0.76	0.64/0.76	0.71/0.86	0.71/0.86
750—F	0.64/0.76	0.64/076	0.63/0.76	0.64/0.76	0.71/0.86	0.71/0.86
750—D	0.71/0.86	0.71/0.86	0.53/0.66	0.71/0.86	0.89/1.08	0.89/1.08
840—F	0.76/0.84	0.76/0.84	1.14/1.22	0.76/0.84	1.02/1.08	1.02/1.08
860—F	0.89/1.08	0.89/1.08	0.89/1.08	0.89/1.08	0.71/0.86	0.71/0.86
875—F	0.64/0.76	0.64/0.76	0.63/0.76	0.64/0.76	0.71/0.86	0.71/0.86
1000—F	0.71/0.86	0.71/0.86	0.71/0.86	0.71/0.86	0.71/0.86	0.71/0.86
1000—D	0.71/0.86	0.71/0.86	0.71/0.86	0.71/0.86	0.97/1.17	0.97/1.17
1125—F	0.89/1.08	0.89/1.08	0.89/1.08	0.89/1.08	0.71/0.86	0.71/0.86
1160—F	1.02/1.08	1.02/1.08	1.02/1.08	1.02/1.08	1.02/1.08	1.02/1.08

接入网用同轴配线电缆技术要求：

（1）内导体应为无缺陷、完整的一根实心铜包铝线。铜包铝线内导体的标称直径、直径偏差、抗张强度和断裂伸长率应符合表 5.6-62 的要求。

（2）电缆的外导体应为圆铝管，可以是焊接的或挤压的。外导体尺寸见表 5.6-63。

（3）电缆护套（或内护套）的标称外径见表 5.6-64，外护层应能经受直流电压 4kV 电火花在线连续检查，无击穿点。整个护套（或内护套）任何部位上的护套最小厚度和最小平均厚度应不小于表 5.6-65 的要求。.

（4）成品电缆冷弯曲：电缆应在－40℃±2℃下进行冷弯曲试验。当用正常或校正视力检查时，试样应无任何可见的开裂、裂纹或其他损伤。在目力检查时允许试样恢复至室温。

（5）成品电缆低温冲击：电缆应在－29℃±2℃下进行低温冲击试验。当用正常或校正视力检查时，试样的护套和绝缘应无开裂、裂纹或其他损伤。

（6）成品电缆护套的纵向收缩：试样长度为 150mm，试样应在 100℃±2℃下保持 4h 后，进行纵向收缩试验。试验后试样的纵向收缩量应不大于 9.5mm。

（7）成品电缆绝缘与铝外导体间的剪切粘着力：试样长度为 110mmn，试样应在 60℃±2℃下进行绝缘与铝外导体间的剪切粘着力试验。绝缘与铝外导体间的剪切粘着力应不小于 1.4N/mm，以绝缘的周长计算。

（8）成品电缆铝外导体与护套（或内护套）间附着力：试样长度为 300m，试样应在 60℃±2℃下进行铝外导体与护套（或内护套）间的附着力试验。附着力应不小于 1.4 N/mm，以铝外导体周长计算。

（9）成品电缆护套的抗磨性：当用正常或校正目力检查时，5 个成品电缆试样中至少有 4 个试样应能经受最小 1000 次精密砂轮磨耗而不暴露出铝外导体或自承式电缆的吊线。精密砂轮对试样的法向压力为 17.8N。

（10）当有要求时，成品电缆需进行耐燃烧性试验，如通过单根电缆或成束电缆燃烧试验。

（11）成品电缆的耐腐蚀性：取 3 根 300mm 长的电缆试样，置于盐雾箱内进行老化试验，试验条件为 33～38℃、相对湿度 100%、食盐溶液浓度为 5%、保持 144h 老化后，用正常或校正视力检查，试样的方孔里应无可见的铝外导体腐蚀痕迹。

（12）成品电缆滴流性：取 3 根 300mm 长的电缆试样，置于循环通风的烘箱内，温度为 80℃±2℃，保持 24h，应无复合物从试样中流出或滴出。

（13）成品电缆渗水性：取 3 根 3m 长无外护层的电缆试样，或去除外护层的电缆试样，经渗水试验后应无水渗出。

（14）成品电缆导体的混线与断线：成品电线的导体应不断线或混线。

（15）成品电缆导体电阻：20℃时成品电缆内导体、外导体最大直流电阻应符合表 5.6-66 的规定。

（16）成品电缆特性阻抗：在 5～200MHz 频率范围内，20℃时电缆特性阻抗应为 75Ω±2Ω。

（17）成品电缆衰减：20℃时，成品电缆的衰减应不大于表 5.6-67 的规定。

（18）成品电缆结构回波损耗：在 5～1000MHz 频率范围内，成品电缆结构回波损耗应不小于 30dB。

（19）成品电缆导体间的介电强度：室温下在成品电缆内外导体间施加工频 1kV 或直流 1.5kV 电压，保持 1min 应不击穿。

（20）成品电缆绝缘电阻：室温下在成品电缆内外导体间施加 100～500V 直流电压，保持至 60s 读数，绝缘电阻应不小于 5000MΩ·km。

（21）成品电缆护套漏电流：电缆试样长 150mm，在铝外导体与护套（或内护套）之间，于 30s 内逐渐将工频电压施加到 1.5kV，保持 60s。在整个 90s 的试验时间内，护套漏电流应不大于 10mA。

表 5.6-66　　导体直流电阻　　Ω/km

规格代号	内导体	外导体
412—F	7.12	1.51
440—D	5.28	1.77
500—F	4.66	1.21
500—D	4.10	1.31
540—F	3.35	1.94
565—F	3.31	1.18
625—F	2.95	0.82
650—D	2.65	0.92
700—F	2.03	0.85
715—F	1.90	1.38
750—F	2.03	0.56
750—D	1.84	0.69
840—F	1.48	0.59
860—F	1.34	1.05
875—F	1.45	0.49
1000—F	1.15	0.26
1000—D	0.95	0.46
1125—F	0.79	0.59
1160—F	0.75	0.26

表 5.6-67 电缆衰减指标 dB/100m

规格代号	频率 (MHz)													
	5	55	211	250	300	350	400	450	500	550	600	750	870	1000
412—F	0.66	2.23	4.43	4.79	5.38	5.83	6.26	6.72	7.05	7.41	7.77	8.82	9.54	10.27
440—D	0.56	1.84	3.64	3.97	4.36	4.72	5.05	5.38	5.64	5.94	6.23	6.76	7.61	8.17
500—F	0.52	1.77	3.58	3.93	4.30	4.69	5.02	5.35	5.68	5.97	6.33	7.12	7.68	8.30
500—D	0.46	1.57	3.12	3.38	3.74	4.04	4.33	4.59	4.86	5.09	5.35	6.07	6.56	7.05
540—F	0.46	1.54	3.12	3.38	3.74	4.04	4.36	4.63	4.92	5.18	5.45	6.10	6.59	7.12
565—F	0.46	1.54	3.08	3.38	3.71	4.04	4.33	4.59	4.89	5.12	5.38	6.07	6.59	7.12
625—F	0.43	1.51	3.02	3.28	3.61	3.94	4.20	4.43	4.69	4.92	5.22	5.84	6.36	6.79
650—D	0.36	1.25	2.49	2.72	2.99	3.25	3.48	3.71	3.90	4.10	4.40	4.92	5.38	5.81
700—F	0.36	1.21	2.46	2.62	2.95	3.21	3.44	3.67	3.7	4.10	4.30	4.89	5.31	5.74
715—F	0.36	1.18	2.43	2.66	2.92	3.18	3.44	3.67	3.90	4.13	4.33	4.92	5.38	5.84
750—F	0.36	1.21	2.43	2.66	2.95	3.18	3.44	3.67	3.87	4.10	4.46	5.02	5.41	5.84
750—D	0.33	1.12	2.17	2.36	2.59	2.82	2.99	3.18	3.38	3.54	3.67	4.17	4.49	4.84
840—F	0.30	1.05	2.10	2.30	2.53	2.76	2.99	3.18	3.38	3.58	3.74	4.27	4.62	5.02
860—F	0.30	1.05	2.10	2.30	2.49	2.72	2.89	3.12	3.28	3.48	3.61	4.07	4.36	4.72
875—F	0.30	1.08	2.17	2.36	2.59	2.82	2.99	3.22	3.38	3.58	3.74	4.23	4.59	5.02
1000—F	0.30	1.02	2.03	2.23	2.46	2.66	2.85	3.02	3.21	3.38	3.54	4.03	4.36	4.82
1000—D	0.23	0.76	1.61	1.77	1.97	2.13	2.30	2.46	2.62	2.76	2.95	3.51	3.77	4.20
1125—F	0.23	0.79	1.61	1.77	1.97	2.13	2.30	2.43	2.56	2.69	2.86	3.18	3.44	3.82
1160—F	0.23	0.79	1.54	1.64	1.94	2.13	2.30	2.46	2.62	2.76	2.92	3.31	3.61	3.94

2.6.3 移动通信收发设备用功率射频电缆

随着移动通信的高速发展，作为关键设施的天线在城市内到处林立，通常选择一些位置合适的大楼，在建筑屋顶上安装天线，这些大楼的安装条件十分严酷，这对于射频电缆来说，要求尺寸小、衰减低、功率大、力学性能好和容易弯曲，工作频段从过去 800MHz 提高到 2000MHz。一般的发泡聚乙烯绝缘同轴电缆不能满足这些要求，新的发泡型氟塑料绝缘，外导体为轧纹铜管小尺寸同轴电缆，可满足敷设和使用要求。电缆结构包括 3 个元件，即内导体、绝缘和外导体，介质材料选择和外导体轧纹是关键问题。选择的绝缘介质应具有较高的工作温度，在工作频率范围内应具有低的 $\tan\delta$，这样有利于减小电缆外径和提高发射功率，外导体的轧纹使电缆获得优越的柔软性和增强机械性能，发泡氟塑料是目前可选的材料。四氟乙烯（PTFE）是常用氟塑料之一，但不能挤塑加工，发泡技术也有难度，若制造电缆长度很短，还可用氟树脂打浆的方法加工，但线速度很慢，如制造 1/8in 电缆的线速度约 1.0m/min，生产率低和经济性差阻碍了其发展前景。新型发泡的热塑性氟塑料克服了这些缺点。表 5.6-68 列出了 3 种常用氟塑料的基本性能比较，其中 PFA 为四氟乙烯—全氟烷基乙烯基醚共聚物，可以热塑挤出并注入氮气发泡，降低 ε 和 $\tan\delta$，从而降低了电缆衰减。FEP（聚全氟乙丙烯）的工作温度比 PFA 低，发射功率相应减小。传统 PFA 与特种 PFA 比较，后者的 $\tan\delta$ 降低了一半还多，也只有 FEP 的一半。电缆结构尺寸及其特性阻抗见表 5.6-69。

表 5.6-68 3 种常用氟塑料的基本性能比较

材料	FEP	PFA	特种 PFA
介电常数 ε	1.96	2.00	1.94
$\tan\delta\times10^{-4}$(2GHz 测量)	8.24	11.9	4.00
工作温度(℃)	200	260	260
软化点(℃)	250～270	300～310	300～310

表 5.6-69 电缆材料和结构

有关参数		传统 PFA 电缆	特种 PFA 电缆
高发泡介质	基础树脂	传统 PFA	特种 PFA
	膨胀率(%)	50	50
电缆结构	内导体(mm)	1.00	1.00
	外导体(mm)	3.58	3.58
	护套(mm)	4.58	4.58
电气规范	特性阻抗(Ω)	50	50

2.7 数字通信电缆

数字通信电缆用于网络信息传输，按电缆敷设部位，分工作区、水平层布线、垂直布线、建筑物间和设备用电缆，本节内容主要参考 GB/T 18015—1999 标准。电缆的部分性能见表 5.6-70～表 5.6-75。最近数字通信电缆已开发了超 5 号缆、6 号缆和 7 号缆，传输频率进一步提高。

表 5.6-70　　3 种数字传输通信电缆结构汇总简化表

结构组成		水平层布线电缆	垂直布线电缆	工作区电缆
导体	材料	退火铜线，不镀锡或镀锡	退火铜线；不镀锡或镀锡	同左栏；薄铜带或薄铜合金带
	结构	单根实心或多根绞合导体 单根导体直径为 0.4~0.8mm 绞合导体最好由 7 根绞合组成	单根实心或多根绞合导体 导体直径为 0.5~0.8mm	单根实心或多根绞合导体 导体直径为 0.3~0.6mm 一根或多根薄铜带缠绕在纤维上
绝缘	材料	聚烯烃、聚氯乙烯、氟塑料（如聚全氟乙丙烯）、无卤低烟热塑料		
	结构	实心绝缘、泡沫绝缘、泡沫实心皮（皮泡皮）		
	色谱	不强制性规定，但应有合适的规范规定，要求容易识别		
单元	结构	线对或四线组，要求容易识别		线对，要求容易识别
	屏蔽	可有合适的单元屏蔽	线对或线组单元无屏蔽	单元无屏蔽
缆芯	结构	有或无屏蔽单元可一起绞合成缆	绞合成缆或绞合成单位再成缆	线对绞合成缆
	屏蔽	缆芯可包覆屏蔽	缆芯或单位可包覆和编织屏蔽	缆芯可包覆屏蔽
护套	材料	聚烯烃、聚氯乙烯、氟塑料、无卤低烟热塑料		
	颜色	不强制性规定		

表 5.6-71　　3 种数字传输通信电缆电气性能汇总

序　号	试验项目	单　位	水平层布线电缆	垂直布线电缆	工作区电缆
1	导体		符合 IEC 60344 要求		
2	电阻不平衡	%	≤3		
3	介电强度	kV	导体间施加直流：1kV 1min 或 2.5kV 2s 不击穿		
4	绝缘电阻	MΩ·km	导体间、导体屏蔽间、屏蔽和屏蔽间均不小于 150		
5	工作电容	nF/km	不规定		
6	电容不平衡	pF/500m	≤1700		
7	转移阻抗（对屏蔽电缆）	mΩ/m	1MHz≤50 100MHz≤100	10MHz≤100	≤100
8	传输性能：（试样：100m）		测试频率：3 类 16MHz　4 类 20MHz　5 类 100MHz，按用途要求		
9	衰减（最大个别值）	dB/100m	见表 5.6-72		见表 5.6-74
10	近端串音（NEXT）	dB	≥表 5.6-73 中的数值		≥表 5.6-75 中的数值
11	特性阻抗　标称值 容许误差	Ω %	100；120；150（1MHz 至各类电缆规定的最高工作频率） ±15		

表 5.6-72　　水平布线和垂直布线电缆中任意线对的衰减指标　　dB/100m

电缆类别	特性阻抗（Ω）			
	频率（MHz）	第 3 类	第 4 类	第 5 类
第 3 类	1	2.6	不适用	不适用
	4	5.6	不适用	不适用
	10	9.8	不适用	不适用
	16	13.1	不适用	不适用
第 4 类	1	2.1	2.0	不适用
	4	4.3	4.0	不适用
	10	7.2	6.7	不适用
	16	8.9	8.1	不适用
	20	10.2	9.2	不适用
第 5 类	1	2.1	1.8	未定
	4	4.3	3.6	2.2
	10	6.6	5.2	3.6
	16	8.3	6.2	4.4
	20	9.2	7.0	4.5
	31.5	11.8	8.8	6.9
	62.5	17.1	12.5	9.8
	100	22.0	17.0	12.3

从 1MHz 至电缆分类最高频率范围内测得的任意线对组合间的近端串音衰减（NEXT）应等于或大于表 5.6-73 规定的数值。对于大于 4 对和 2 组四线组的电缆，近端串音衰减功率应等于或大于表 5.6-74 的数值。

表 5.6-73　　水平布线和垂直布线电缆近端串音衰减（NEXT）指标　　dB

频率（MHz）	第 3 类	第 4 类	第 5 类
1	41	56	62
4	32	47	53
10	26	41	47
16	23	38	44
20	不适用	36	42
31.5	不适用	不适用	40
62.5	不适用	不适用	35
100	不适用	不适用	32

表 5.6-74 工作区电缆中任意线对的衰减指标 dB/100m

电缆类别	特性阻抗(Ω)	100	120	150
	频率(MHz)	第 3 类	第 4 类	第 5 类
第 3 类	1	3.9	不适用	不适用
	4	8.4	不适用	不适用
	10	14.7	不适用	不适用
	16	19.6	不适用	不适用
第 4 类	1	3.1	3.0	不适用
	4	6.4	6.0	不适用
	10	10.8	10.0	不适用
	16	13.3	12.1	不适用
	20	15.3	13.8	不适用
第 5 类	1	3.1	2.7	在考虑中
	4	6.4	5.4	在考虑中
	10	9.9	7.8	在考虑中
	16	12.3	9.3	在考虑中
	20	13.8	10.5	在考虑中
	31.5	17.7	132	在考虑中
	62.5	25.6	18.7	在考虑中
	100	33.0	25.5	在考虑中

表 5.6-75 工作区电缆中近端串音 (NEXT) 指标 dB

频率 (MHz)	第 3 类	第 4 类	第 5 类
1	44	56	62
4	32	47	53
10	26	41	47
16	23	38	44
20	不适用	36	42
31.5	不适用	不适用	40
62.5	不适用	不适用	35
100	不适用	不适用	32

2.8 海底通信电缆

现代海底通信电缆是宽带、低噪声的传输线路。可分深海电缆（指深度 1000m 以下）、中海电缆（指 500～1000m 间）、浅海电缆（指深度不到 500m）。结构上分对称型、有铠装同轴型和无铠装同轴型 3 种，详见电线电缆手册。浅海海底对称通信电缆型号、名称和用途见表 5.6-76。浅海海底同轴通信电缆产品型号、名称和用途见表 5.6-77。浅海干线 5.7/25 和 4/15 同轴通信电缆，敷设于沿海大城市间或岛屿之间，系统采用单电缆制，双向开通 120 个电话，允许敷设深度不超过 500m，产品型号、名称和用途见表 5.6-78。当前海底光缆技术成熟，不少地域用海底光缆取代海底通信电缆。

表 5.6-76 浅海对称通信电缆型号、名称和用途

型 号	名 称	用 途	敷设深度
HH—1—2	浅海用 2 对海底对称载波通信电缆	供浅海单路载波通信	不超过水下 50m
HH—0—8	浅海用 8 对海底对称音频通信电缆	供浅海近距离音频通信	

表 5.6-77 浅海同轴通信电缆型号、名称和用途

型 号	名 称	用 途	敷设深度
HHO	2.7/9.8 浅海用海底同轴通信电缆	用于载波频率 150kHz 以下的载波通信	不超过水下 200m
	5/18 浅海用海底同轴通信电缆	用于载波频率 150kHz 以下的载波通信	
	1.25/15 浅海用海底同轴通信电缆	开通 24 路载波电话	

表 5.6-78 浅海干线同轴通信电缆型号、名称和用途

型号	名 称	适用范围	用 途
HHO41	单层组钢丝铠装浅海同轴电缆	一般浅海海区	传输高频
HHO441	双层组钢丝铠装浅海同轴电缆	较为复杂的浅海海区	载波信号
HHOP41	单层组钢丝铠装岸边屏蔽同轴电缆	有较强电磁干扰	
HHOP441	双层组钢丝铠装岸边屏蔽同轴电缆	有较强电磁干扰的复杂浅海海区	
HHOP21	钢带铠装岸边屏蔽同轴电缆	岸边陆地直埋	
HHD41	单层组钢丝铠装接地电缆	一般海区	端局载波设备、供电设备的接地部分和海洋接地电极的连接
HHD441	双层组钢丝铠装接地电缆	复杂海区	
HHD21	钢带铠装接地电缆	陆地直埋	
HHY	一般引出电缆	一般海区	沿海干线同轴电缆和增音设备电气连接
HHYL	防硫化氢引出电缆	硫化氢较多的特殊海区	

3 通信电缆的选用、敷设和测试

本章虽然系统地介绍了各种通信电缆，但由于信息技术的高速发展，不少品种通信电缆在制造技术、使用性能和综合成本方面均处于落后状态而被淘汰，新建设通信工程中已不再选用，只是过去已经建设的工程中有部分保留使用，并且还在工程逐步改造而被新品种所更新。以下叙述的情况，有的还是属于过去的甚至很经典的概念，如今当然不会再照搬这些原则，但在整个世界上却并不完全被否定，中国的通信技术已经跨入世界前列，一定会运行最新的规则。

通信电缆的试验项目较多，除常见电缆绝缘和护套的力学性能、物理及化学性能、常规电气性能和成品电缆的力学性能及特殊性能（如渗水）外，更多的是偏重于信号传输性能。经典的试验方法大多用手工操作，精度差且工作量大，近代已广泛采用自动化测试仪器。

3.1 通信电缆的选用

通信电缆的选用是根据通信要求、敷设环境、技术和经济的合理性等综合因素来确定。空气—纸绝缘对称式铅套市内通信电缆具有 100 年以上使用经验，只要维护保养得当，使用寿命极长，但产品成本较高，我国已完全用塑料绝缘替

代。塑料电缆的防潮性能不如铅套电缆好，因为铅套可认为完全不渗水分，密封性强，还不能说在世界上被完全淘汰。当欧州、美国、日本和中国已经不生产空气—纸绝缘铅套电缆时，仍有国家向中国购买这种电缆。20 世纪 50 年代以前，中国农村几乎没有电话，50 年代开始建设农村电信系统，在当时的条件下，唯一可选用的仅仅是架空明线（至今还不能说完全绝迹）。因为空气—纸绳纸带绝缘对称式长途通信电缆成本太高，不可能大量推广使用，当时仅在大城市周边敷设布点。为了加快农村通信建设，20 世纪 80 年代发展了塑料绝缘农村用对称通信电缆，并形成完整的系列，在历史上发挥了一定的作用。综合同轴（小同轴）电缆在结构和功能方面具有独特性，在电气化铁路建设中使用具有优势，曾承担了很重要的通信任务，但当综合光缆普及采用后，小同轴电缆也就逐步退出历史舞台。综合同轴（中同轴）电缆的情况与小同轴电缆有些类似，曾经是大城市之间电视及其他信号传输的唯一工具，但高性能综合光缆和卫星通信问世后，也逐步退出市场。接入网配线射频电缆是当前有线电视传布的主要途径，短期内不大可能被光缆替代。数字通信电缆是目前新型建筑的必备布线系统，是否有朝一日，会被先进的用户光缆替代，也取决于技术和成本二方面的竞争。当前“三网合一”通信系统开始抬头，所谓“三网合一”就是电话、电视和数字三大通信网络合在一起，由光缆直接到各建筑，建筑内设置光电转换设施，仍通过原来的电话线路、有线电视线路和宽带线路，分别连接每家每户的电话机、电视机和计算机，这样一来就节省了大量市内通信电缆和射频电缆。但这项崭新的技术，对于已经建设完善的大城市来说，也不一定急于求新，否则将浪费很多的现有设备和系统资源。

3.2　通信电缆的敷设方式及其结构的选择

通信电缆的敷设方式需根据敷设环境来确定，并选择相应的电缆结构，主要取决于护套、铠装和外护套结构。

（1）架空敷设可选用裸铅套、裸铝套电缆或塑料护套自承式电缆。目前多采用铝—聚乙烯或钢—聚乙烯粘结综合护层。电缆基本不承受机械拉力，完全有钢绞线支撑。裸铅套电缆会受到一种竹蜂（蜂种之一）的侵害，竹蜂将电缆误认为竹子，将铅套刺穿产卵，电缆则受潮损坏。塑料套电缆（包括铝—塑）会受到一种鸟的侵害，电话电缆发出的微弱鸣声，鸟误认为内有虫子，为捕虫而啄穿，并啄断导体而致电缆失效，此外气枪射击也可击穿塑料套。采用钢—塑护套或轻型钢带铠装护层有显著的改善成效。

（2）管道敷设的电缆，在使用中一般不承受径向压力，只是在敷设过程中受到一定的拉力，而这种拉力一般并不会大到超过电缆允许承受的限度，因此可选用裸铅套或带有防腐蚀的聚乙烯或聚氯乙烯外护套的铅或铝套电缆，但不得采用裸铝套电缆，因地下管道难免浸水，裸铝套容易腐蚀。目前最多的是采用铝—塑护层。

（3）直埋敷设电缆受到径向压力，护套应具有承受压力的能力，可采用塑料保护的铝套电缆或双层钢带铠装铅套电缆，也可采用铝—聚乙烯—皱纹钢管综合护层电缆。当敷设坡度超过 45°时，考虑到电缆自重的拉力作用，应采用铝护套或有钢丝铠装的铅套电缆。

（4）浅水敷设时，电缆受到一定的拉力，但拉力并不非常大，因此需按具体情况来确定采用单层细圆钢丝铠装电缆。

（5）海底敷设时一般深度较深，电缆受的拉力较大，并且局部电缆有晃动的可能，常采用粗钢线铠装护层电缆。

（6）防生物侵袭，通常指白蚁虫类和鼠类动物的侵袭，过去常在电缆外护层上浸涂或渗混防生物侵袭的药物，也采用含药物的塑料护套，如果所含药物对环境有害，目前已经禁用，现在只允许用无公害药物，但效果终是不很理想。近年来主张硬质塑料护套，如超高密度聚乙烯，和聚乙烯外挤硬质尼龙或 PBT（化学名为聚对苯二甲酸丁醇酯）材料。

（7）在雷暴日较多的地区，必要时采用特殊结构的防雷电缆。电缆的内护套应具有较高的绝缘性能，其外用铝导体进行铠装，最后再挤包塑料护套，由于铝的导电性好，在接地良好的条件下，雷击过电压不易感应到电缆内的工作线芯上，不至于造成事故。

（8）在要求抗电磁干扰的场合下，应采用屏蔽护层的电缆，其结构按抗干扰要求而定。在电气化铁道临近敷设的电缆，铝套双钢带铠装基本可符合要求，当然不否定其他铜带加铜线等结构。

3.3　通信电缆敷设时的注意事项

（1）架空敷设时，须用吊线（钢绞线）和挂钩，将电缆吊挂架空。吊线直径由电缆外径、重量、风负荷及杆塔跨距大小来决定。自承式电缆可直接架空敷设。架空电缆线路应有防雷保护，即在一定间隔的电杆上设置避雷接地线。

（2）管道敷设时，电缆应预先涂以中性凡士林或黄油，以减小电缆与管道的摩擦，以及减少混凝土管中石灰质对铅和铝护套的腐蚀作用。在电缆进入人孔时，弯曲半径应不小于电缆盘筒径的半径，并应避免与人孔边缘的摩擦。

（3）直埋敷设时，既应考虑电缆不易遭外界机械损伤、化学腐蚀和生物侵害，也要考虑外界振动和冰冻不致损伤电缆。为了不受大气温度的影响，保证传输参数的稳定，电缆埋设深度通常为 1m 左右，干线长途电缆为 1.0～2.0m。电缆敷设的最小弯曲半径（以电缆外径的倍数表示）：一般铅护套电缆为 15 倍；铅护套中同轴电缆为 25 倍；铝护套电缆为 30 倍；铝－塑护层电缆为 20 倍。

（4）水底敷设时，水下电缆应敷设在水底的沟中，敷设长度须考虑有足够的富裕量，使电缆能在河床上松弛敷设，以免因河床变化使电缆悬于水中，增加电缆所受的张力。如河床凹凸不平，则电缆应有更多的敷设裕量。

3.4　通信电缆接续时的注意事项

通信电缆的线路质量与电缆接续工作有很大关系。电缆接续后，各制造长度的电缆应尽量保持原有的电气性能和机械性能，接头要牢固，并且具有和电缆护层同等的防潮能力。护套热焊时，应防止电缆绝缘的烫伤，有关通信电缆接续见参考文献。

3.5　通信电缆的测试

通信电缆各项电性能的测试是保证电缆产品质量极其重要的一环。因此，当电缆制成后，必须立即对其电性能进行全面的测试。由于通信电缆的种类多，要求各异，所以须测试的项目也各有不同。随着电子技术的发展和通信电缆使用频带的加宽及使用范围的扩大，相应的通信电缆的测试方法也就日趋增多。通信电缆主要的电性能测试项目包括：导线直流电阻、回路不平衡电阻测试；绝缘电阻和交、直流耐压

测试；工作电容测试；电容耦合与电容不平衡测试；串音衰减及串音防卫度测试；电缆一次及二次传输参数测试；衰减测试；衰减温度系数测试；以及防护作用系数（理想工频屏蔽系数）测试等。

经典的测试仪表基本是人工操作，精度低、时间长，其测试原理及仪器的组成可参考 GB 544—1985 标准。近代市内通信电缆测试仪器已全盘自动化。测试仪器由主机、计算机系统和高频测试系统组成。可以完成测试的项目包括导体电阻、回路电阻、电阻不平衡、电容不平衡、衰减、近端串音、远端串音、特性阻抗等。在每次测试前都应自动进行再校准。

试验中技术要求：

（1）按电缆产品规范要求，测试前选择符合要求的接线，才能取得正确的测试数据。

（2）该系统的操作应严格按操作程序进行。

（3）保证设备可靠正常运行，不许其他计算机软件、软盘在该系统的计算机上使用。

试验结果及计算测试系统按市内通信电缆产品标准有关电缆的各项电气性能及长度与温度换算关系进行自动修正，打印所有测试值，最大值，平均值，功率平均值，单线对功率和，M—S值，发生变异值等。

4 通信光缆

光纤的应用范围很广，通信光缆是其中技术发展最快，数量最大的一类。我国从 20 世纪 80 年代开始研究和开发，至今已经进入大规模商品时代，光缆产品的利润也从丰厚下降为薄利时代。当今如何大规模发展用户光缆，将是下一步的技术对策。

4.1 光纤的基本概念

导光纤维（简称光纤）是一种介质波导，它是纤维光缆中主要元件。如图 5.6-6 所示，它由纤芯和包层构成。位于中心部分的纤芯折射率 n_1 比周围包层的折射率 n_2 略高。光信号主要经纤芯传输，包层为光信号提供反射边界和光隔离，同时又起到一定的机械保护作用。为了保证光纤的强度，在光纤包层外还有一层或数层起增强作用的被覆层。

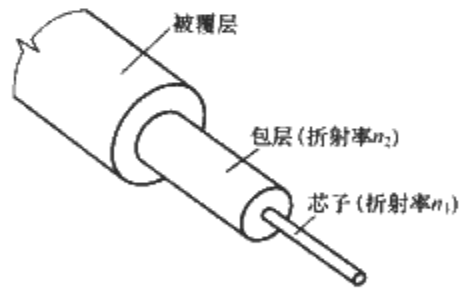


图 5.6-6 典型的光纤结构

光波在光纤中的传播过程可以应用射线理论或模式理论来解释。前者是把光看作射线，引用光学中的反射和折射原理来描述光波在光纤中传播的物理现象；后者来自微波波导技术，它是把光波当作电磁波，将光纤当作光波导，用电磁场分布的模式来解释光波在光纤中的传播现象。射线理论是模式理论的极限情况，它比较直观，适合于进行定性分析；模式理论可以比较完整和全面地解释光波在光纤中的传播现象，但它也有不足之处，因此常需要两种理论联系起来应用。

早期人们利用光学玻璃制成的光纤传输光能，但由于材料的损耗高达 1000 dB/km 以上，光纤只能在几十米内进行传输。1970 年由于原材料的高度纯化和工艺的突破，首先研制出了衰减为 20 dB/km 的掺杂石英光纤，可认为达到了应用门限。而后 10 多年内随着技术的不断发展，石英光纤的衰减分贝又下降了 2 个数量级，在 1550nm 波下的衰减已达 0.14dB/km，接近理论极限的水平。

由于光纤衰减小、频带宽、抗干扰、重量轻、尺寸小，且原料来源丰富，因此在通信系统中，特别是长途线路中使用的通信电缆正逐渐由光纤制成的光缆所代替。光纤进入办公大楼和家庭的时代也即将到来。

4.2 光纤的分类

按传输的模式可将光纤分为单模和多模 2 种，按材料组成可分为石英基光纤、聚合物包层光纤、多组分玻璃光纤和塑料光纤等种类。

光纤中传播的模式多少是由光纤的重要参数——归一化频率 V 值所决定的。

$$V=\frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2-n_2^2} \qquad (5.6\text{-}12)$$

式中，a 为光纤纤芯的半径；λ 为自由空间的波长；n_1 为纤芯的折射率；n_2 为包层的折射率。

当光纤的芯径很细，仅数倍于所传输的光波波长时，$V<2.405$，则在光纤中只有一个主模 HE_{11} 能通过，其他模均被截止，这种光纤称为单模光纤。单模光纤传输带宽很高，可达数十吉赫×千米（GHz·km），而且由于制造技术的发展，其生产成本已明显低于多模光纤，因此它的应用（特别是在长距离的传输系统中的应用）越来越广泛。

当光纤芯径为波长几十倍时，$V>2.405$，在光纤中将是多模传输，这种光纤为多模光纤。若光纤纤芯的折射率为常数 n_1，在纤芯与包层的界面上发生突变，即从 n_1 降到 n_2，这种光纤称为多模突变型光纤。在这种光纤中，射线是按全内反射的曲折路程向前传播，满足全内反射条件的不同射线各有不同的路程长度，由于光纤纤芯内折射率均匀，不同角度射线具有同样的速率，因此到达接收端的时延不同，势必造成显著的脉冲展宽，从而限制了传输带宽，一般仅为数十兆赫×千米（MHz·km）。

若光纤纤芯轴心处的折射率最大为 n_1，沿着径向折射率逐渐减小，到了与包层的界面，其折射率与包层的折射率 n_2 相等，这种光纤称为渐变型光纤，在这种光纤内，射线不是按全内反射，而是按折射原理经近似正弦形的途径向前传播，幅度不同的正弦形途径的长度不等，但传播速率也不等，较长的轨迹有快的速率，而不同长度轨迹的射线到达接受端的时延却几乎相同，大大提高了光纤的传输带宽，一般可达数百兆赫×千米，甚至数千兆赫×千米。

按材料来分，石英基光纤是目前产量最大、性能最佳和应用最普遍的品种。它由二氧化硅（$Si(O)_2$）和各种掺杂剂（Ge、P、F）所构成。

聚合物包层光纤是指纤芯由玻璃、包层由一种折射率比纤芯低的聚合物构成的光纤。这种光纤制造简单且成本低，具有较大的芯径和较大的数值孔径，可用于计算机网络和医疗器材。

多组分玻璃光纤是以含有多种氧化物成分的玻璃作为纤芯材料、且光谱特性与石英基光纤接近的一种光纤，由于玻璃成分的选择广泛，所以容易制造廉价的大芯径、大数值孔径光纤。这种光纤的羟基含量比石英光纤高，主要应用于中、短距离光纤通信系统中。

塑料光纤是由高折射率的透明塑料纤芯与低折射率的透

明塑料包层构成的光纤。制造塑料光纤的主要树脂有二大类：一类是聚甲基丙烯酸甲酯；另一类是聚苯乙烯。与无机玻璃质光纤相比，塑料光纤柔软、质量轻、不易折断、制造成本低，但传输衰减大，抗张强度低，容易老化。这种光纤只能用于短距离通信系统中。

除了上述各种光纤之外，还有一些特殊用途的光纤，例如用作光纤放大器的掺铒（Er）光纤，可用作光纤传感器及用于相干光纤通信系统的偏振保持光纤。

至于期望在超长距离无中继传输系统应用的中红外光纤，目前正在开发之中。其中氟化物光纤的衰减已降到1dB/km以下，预计衰减值可达0.03dB/km，是现有石英光纤衰减值的1/6。

4.3　光纤的特性

光纤的主要特性包括传输特性和力学特性，而传输特性又包括衰减和色散两方面。

（1）光纤的衰减。光纤的衰减是由吸收损耗、散射损耗、弯曲损耗和微弯损耗引起的，以下仅讨论前二者。

1）吸收损耗主要来源于制造光纤材料的本征吸收、材料中的杂质吸收和结构中原子缺陷吸收。本征吸收是由于紫外区的电子跃迁和从近红外到远红外区的晶格振动或多声子过程引起的吸收带。前者对于大于0.6μm的光波段影响不大，而后者可通过合理选择掺杂材料等来减小其影响。杂质吸收主要是铁、钴、镍、铜、锰、铬、钒、铂等过渡杂质和OH根产生的吸收，OH根在2.8μm波长有吸收峰，二、三次谐波的吸收分别发生在1.4μm和0.94μm。通过原材料的严格提纯和光纤制造工艺的改进，OH根的吸收峰在0.7～1.6μm整个波段范围内可减到很小，甚至基本消灭。至于过渡金属杂质的含量，由于使用高纯度的原材料后，可控制在10^{-7}%（10亿分之一）以下，其影响甚微。原子缺陷吸收是由于光纤制造过程中玻璃受到某种热激励，或在某些情况下受到强辐射而感生的。但这些可通过优选制造工艺和合适的掺杂材料得以减小。

2）散射损耗主要来源于瑞利散射，它是由透明材料中原子热起伏冻结引起密度变化和折射率变化引起的。瑞利散射损耗系数与波长λ^4成正比，当$\lambda>1.0\mu m$时，瑞利散射衰减极小，可忽略不计。另有一种由于光纤波导结构缺陷引起的与波长无关的散射衰减，它可以通过严格的工艺控制得到改善。此外还有一种微弯衰减，它是在光纤光缆制造过程中光纤受到不均匀应力的作用致光纤轴产生的微小不规则的弯曲，使传导模转换为辐射模而引起的。随着原材料提纯和光纤制造技术的不断进展，OH根的吸收峰在整个波段范围内已可基本消除，且在1.1～1.7μm的范围内光纤衰减常数均小于1dB/km。这就为光纤通信的波分复用创造了良好的条件。

（2）光纤的色散。光纤的色散分为模式色散、材料色散和波导色散三类。模式色散是各模间的色散，也称模间色散；材料色散和波导色散是指一个模式本身色散，也称模内色散。在多模光纤中主要是模式色散。在单模光纤中没有模式色散，但光源有一定的谱宽，光纤材料本身对不同波长的光波有不同的折射率，因而有不同的传播速率，到达接收端有不同的时延，引起脉冲展宽，这就是材料色散。对于石英光纤，在$\lambda<1.27\mu m$时，材料色散为正；$\lambda>1.27\mu m$时，材料色散为负。波导色散是由于基模的群速度与波长有关所引起的。它与线芯直径、折射率差也有关。波导色散总是正的，数值也小，在波长1.31μm附近。正的波导色散恰与负的材料色散相抵消，因此单模光纤的总色散为零。总色散为零时波长即称为零色散波长。由于1.31μm附近又是一个低衰减"窗口"，这样单模光纤兼有低衰减和低色散的双重优点，特别适用于长距离大容量的通信系统。单模光纤在1.55μm处衰减更小，已能够通过改变光纤的折射率分布将零色散波长移至1.55μm左右，制得了所谓色散位移光纤，适合于更长距离的大容量通信系统。一种在1.31μm与1.55μm之间色散平坦的光纤已经问世，可实现超大容量通信，适合于波分复用系统。

（3）光纤的力学性能。光纤的力学性能与光纤的使用寿命密切相关，它包括光纤的抗拉强度、大长度筛选强度和抗疲劳强度3个方面。

石英光纤的标称直径为125μm，按玻璃原子间的结合力推算，该光纤能承受300N的拉力。实际上光纤若不加涂覆层，由于光纤表面缺陷（微裂缝）的迅速发展，其强度极低，抗拉力不足1N，但加上涂覆层后，将光纤表面与环境中的水分、化学气分隔离开，阻止了光纤表面上已有的微小缺陷的进一步扩展，使光纤的抗拉力达到70N左右，这比同样粗细的钢琴丝的抗拉力还高出一倍。光纤的抗拉强度通常以图5.6-7所示的韦伯尔分布曲线所表示。曲线的斜率越陡越好，表示各段光纤的抗拉强度一致性好。

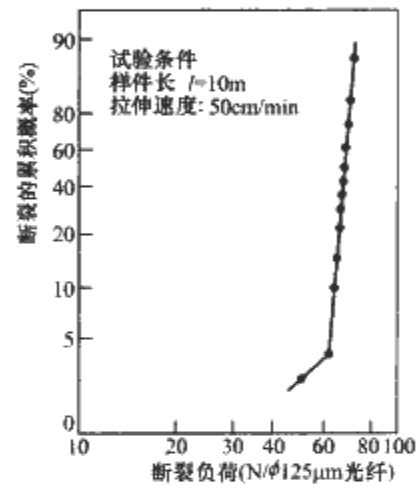


图 5.6-7　光纤抗拉强度韦伯尔分布示例

韦伯尔分布曲线与被测光纤的样品长度、拉伸速度等试验条件有关。它对光纤强度来说只有统计的指导意义。实际使用的光纤是要求在整个制造长度上具有某一最低允许的抗拉强度。因此控制涂层后的光纤都必须在不小于0.5%应变的情况下经受持续1s的全长强度筛选试验。对于海底光缆，由于可靠性要求很高，规定的筛选应变高达2%。对于125μm直径的光纤，约相当于20N的筛选张力。

光纤的抗疲劳强度以其抗疲劳参数n来表征。一般使用的有机涂覆层光纤n值约为22；对于密封涂层光纤的n值可达200以上。n值越高，光纤允许的应变越接近筛选应变，光纤的可靠性越高。

4.4　光缆的结构

经过一次涂覆的光纤大大提高了机械强度，但光纤毕竟与通信电缆中的金属导线不同，需根据光纤的特点确定光缆结构设计的几个基本原则。

（1）光缆的主要构件。

1）在光缆中加入抗张元件，使其承受绝大部分张力。当受到张力负荷时，光缆中各元件承受的张力值是按各元件的弹性模量与截面积的乘积成正比分配，因此必须选用高弹性模量的材料来构成抗张元件。通常限定光缆中光纤的应变应不超过0.2%，再根据所需承受的张力或1km长光缆的自重来确定抗张元件的截面积。

高强度钢丝是理想而又经济的材料，使用最为普遍。单

根钢丝的杨氏弹性模量约为200GPa，钢绞线的杨氏弹性模量约为180GPa。在有强电干扰的场合或对光缆重量有限制的情况下，则使用多股芳纶（国外商品号Kevlar-49）或用纤维增强塑料（FRP）棒作为抗张元件。这两类抗张元件的杨氏弹性模量分别在120GPa和50GPa左右。

2）进一步保护光纤，使其尽量与外界压力隔离。一次涂覆的光纤在成缆前，一般均需加上二次被覆层；若直接成缆，需将一次涂覆光纤安放在骨架的开槽中。二次被覆层是由挤出的尼龙、聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）、聚丙烯、聚乙烯和氟塑料等树脂所构成。这些材料的弹性模量比玻璃约低2个数量级，但因为二次被覆层的截面比光纤本身的截面大得多，因而二次被覆层除了提高光纤抗侧压性能外，还可改善光纤的抗拉性能。若二次被覆层与一次涂覆层之间存在间隙或充填胶状物，光纤可在其中松动，这种被覆称为松套结构；若二次被覆层与一次涂覆层之间无间隙，则称为紧套结构。松套结构内可含单根光纤，也可含带有不同色标的多根光纤。光纤一次涂覆层的外径一般为250μm，松套外径为1.5～3.0mm。为了保证光纤性能，管内一般均充填胶状物。紧套结构内只含一根光纤，光纤一次涂层的外径一般为400μm，紧套外径为0.8～0.9mm。

3）应考虑光缆的弯曲半径和柔软性要求。光纤伸长能力较差，光缆设计时最好把光纤安排在轴线附近，或者能提供一定的自由活动空间，使光缆弯曲时光纤能自动调整到受力最小的位置上。与通信电缆一样，光缆一般也是采用绞合结构，并应根据要求合理选择绞合节距。

4）保持光纤的传输特性。应设计合理的光缆结构和选择适当的光缆材料，尽量避免由机械力和温度变化引起的微弯损耗。

5）应考虑光缆结构空间的利用率，降低光缆成本。

6）在结构上应尽量便于光缆的制造、维修和接续等。

（2）光缆的4种基本结构。

1）层绞式光缆是在中心抗张元件周围绞合数根二次被覆光纤所构成，一般均为单层绞合，适合制造光纤数比较少的光缆。如图5.6-8（a）所示，由于松套结构一管多纤技术的成功，这种结构的光缆也可达36芯，甚至于高达96芯。

2）骨架式光缆是在抗张元件外挤塑料骨架，然后将一次涂覆光纤嵌入骨架的开槽中。槽可呈螺旋形，也可为S—Z型。每槽可放一根光纤，也可放多根光纤或光纤带，如图5.6-8（b）所示，适合制造光纤数比较少的光缆。

3）中心管式光缆是在一根高密度聚乙烯塑料管内填充胶状物，以12根不同色标的光纤为一组，最多可含8组共96根光纤。若以18条12芯的光纤带叠合在一起，缆中则可含216根光纤。塑料管外加阻水带和皱纹镀铬钢带铠装层，作为抗张元件的2根直径为1.6mm的钢丝，沿铠装层纵向放在缆芯轴线对称的两侧，再挤上高密度聚乙烯护套，如图5.6-8（c）所示。由于该缆的光纤处于缆的中心，光纤所受的应力较小，且因为抗张元件的轴线对称安放，致使抗张元件优先弯曲。所谓优先弯曲就是指当2根上下纵向放置的钢丝，造成光缆不容易在上下方向弯曲，而在左右方向的弯曲比较容易，限制了弯曲方向，既减小了应力，又提高了灵活性和稳定性。

4）单位式光缆是先把若干根光纤以层绞式或骨架式制成光纤单位，然后再将若干光纤单位绞合而成，如图5.6-8（d）所示，另一种以骨架为单位绞合而成，如图5.6-8（e）所示。

各种光缆适用于不同场合。对于通信干线用光缆和城市局中继用光缆，一般为12芯和48芯，多者不会超过百芯，缆芯结构采用层绞式、骨架式或中心管式。由于光纤进入大楼到户的日渐需求，光缆正迅速扩展到用户网络，随着用户数量的不断增长，用户光缆正向密集型大芯数方式发展，数百芯、上千芯的光缆已经问世。今后可望发展到4000芯，与市内通信电缆的最大线对数相当。大芯数用户光缆的缆芯结构一般均采用单位式，如图5.6-8（d）所示。缆芯的单位由绞合在中心加强件周围的5根二次被覆管组成，每根管中含12根光纤，每个单位共含60根光纤，7个单位再经绞合，缆中共包括420根光纤，光缆外径仅31mm。图5.6-8（e）所示的用户光缆，每个聚乙烯骨架有5个槽，每槽堆叠5个8芯光纤带，形成200芯光纤单位，再将5个单位绞合成含1000芯的光缆缆芯，光缆外径只有40mm。光缆的缆芯中可有充填或不充填胶状物，但以前者为多。

4.5 光缆按敷设和用途的品种分类

根据不同的使用环境，光缆可分为以下几品种：

（1）直埋光缆主要应用在长途通信线路中。光缆直接埋在地下，必须有防水层和铠装层。

（2）管道光缆主要应用在市内中继线路中。光缆敷设在管道或隧道内，采用铝带聚乙烯复合护层，管道光缆目前的用量较大。

（3）架空光缆主要应用在省内干线或区域通信线路中。它的安装敷设费用较少，施工速度也快，但易受外界环境的影响，线路可靠性和使用寿命不如前两种光缆。为了防止鸟枪的枪击，光缆往往附加轻型金属铠装层。

（4）室内光缆主要应用在大楼内的局域网中或作为室外光缆线路的室内引入缆。它要求光缆必须具有阻燃特性，外护套采用无卤低烟材料为佳。

（5）设备内部光缆供设备内部线路连接，一般是轻巧的单芯或双芯光缆，使用长度较短。国外在汽车中已考虑

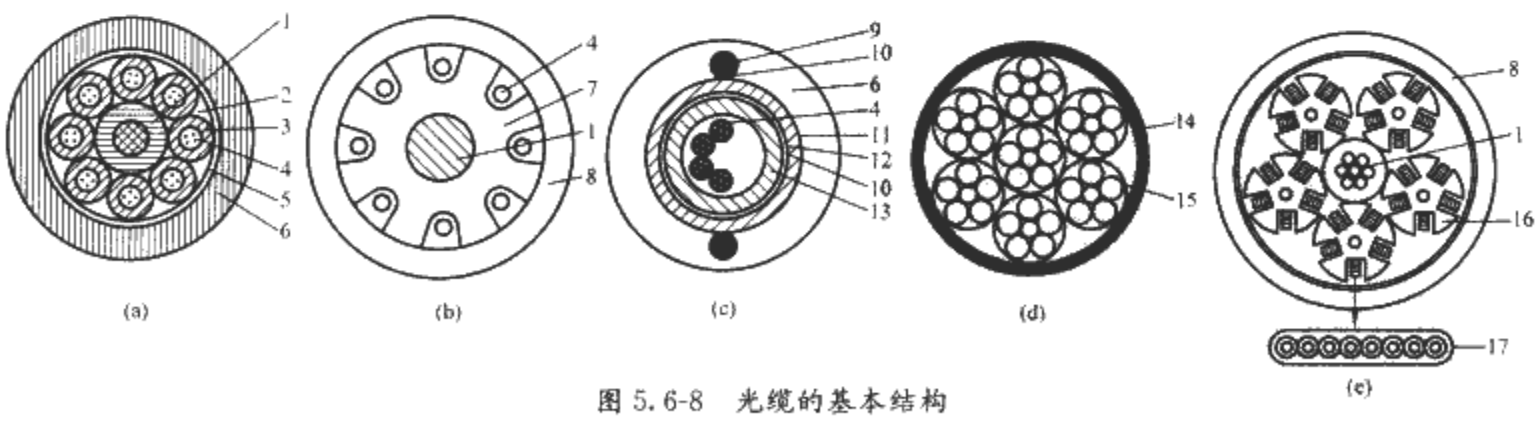


图5.6-8 光缆的基本结构

（a）层绞式；（b）骨架式；（c）中心管式；（d）层绞单位式；（e）骨架单位式

1—中心抗张元件；2—填充物；3—松管；4—光纤；5—包层；6—聚乙烯护套；7—开槽聚乙烯骨架；8—护套；9—钢丝抗张元件；10—撕裂绳；11—皱纹钢带；12—阻水带；13—高密度聚乙烯管；14—芳纶纱及外护套；15—光纤单位；16—骨架；17—8芯光纤带

使用。

(6) 软光缆主要应用在非固定场合，例如军用移动通信。它要求光缆柔软，尺寸小，重量轻，具有良好的弯曲性能和足够的抗拉伸能力。

(7) 水下光缆应用于通信线路的过河区段，要求光缆具有良好的径向和纵向密封性能。为了提高光缆的抗拉伸能力和防止外界的机械损伤、在缆芯外需增加钢丝铠装层。

(8) 海底光缆其敷设长度较长，要求光纤衰减小、频带宽和尺寸小。海底通信电缆逐步被海底光缆所代替。为了承受敷设及打捞时出现的张力，抵御敷设时出现的外界压力和水下压力，对光缆缆芯和抗张元件必须进行精心设计。图 5.6-9 所示的海底光缆中采用了单模光纤。光缆设计的最大承受水压为 80MPa，能承受的抗张力为 80kN，直流电阻为 0.4Ω/km，最高供电电压为 ±6000V。

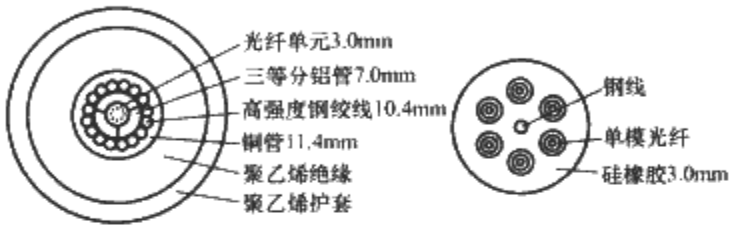


图 5.6-9　海底光缆示例及其单元部分放大

近年来，采用 VAD 法开发了一种以纯 SiO_2 为纤芯的所谓“Z”光纤，其衰减小，抗辐射性能好，已应用在 1992 年完工的横跨太平洋的 TPC—4 通信系统中。

对于密封涂层光纤，其 n 值高，能长时间承受高应变，在潮湿条件下 n 值几乎是恒定的，抗氢损能力强，因此用密封涂层构成的海底光缆，水密性并不非常重要，可以应用与陆上光缆相类似的简单结构，从而大大降低线路的成本。

(9) 专用光缆的品种多样化，现举以下 3 例：

1) 光电综合通信光缆，如图 5.6-10 所示，缆中含一个 8 芯光纤单位，7 个铜线四线组和 9 个对称线对。该缆主要应用在铁路通信系统中，光纤作为大容量通信，四线组和线对作为铁路的区间通信和信号传输用。由于将光缆和电缆并成一缆，可降低线路的造价。

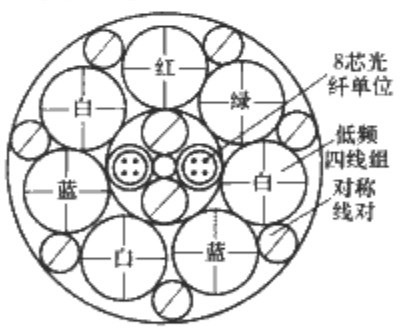


图 5.6-10　综合光缆示例

2) 光纤复合电力电缆是将光纤放置在三相缆芯的间隙中构成复合缆。既能传输电力，又能实现无感应和没有串话的数据通信。由于光纤是绝缘体，大部分情况下不影响电力线芯的工作状态。这类光纤复合电力电缆可应用于石油采集站和石油平台之间供电、遥控、报警、工业电视和电话通信等。

3) 光纤复合架空地线（OPGW）是高压架空输电线路中的架空地线和通信用光纤组成的特殊产品，具有防雷保护和通信 2 种功能。光纤具有信息容量大、传输衰减小、不受电磁干扰及使用安全可靠等优点，能适应电力系统中遥控、遥测和大容量信息传输的需要。绞线的原则与一般架空导线基本相同，光纤的结构设计和传输特性既要达到通信要求，又要符合高压架空线的工作要求。

4.6　光缆主要品种的型号和名称

通信光缆主要用于公共通信网、专用通信网、通信设备和采用类似技术的装置中，参考 GB 7424《通信光缆的一般要求》、GB 13993《通信光缆系列》和 ZBK 13011《通信光缆》标准。常用通信光缆的名称、型号和适用场所，见表 5.6-79，但一些专用光缆的型号均未列入。

表 5.6-79　常用通信光缆的名称、型号和适用场合

型　号	产　品　名　称	适用场合
GYA	金属加强构件松套层绞式铝聚乙烯粘结护套通信光缆	架空、管道或隧道等固定敷设
GYTA	金属加强构件松套层绞填充式铝聚乙烯粘结护套通信光缆	
GYGTA	金属加强构件骨架填充式铝聚乙烯粘结护套通信光缆	
GYDGTA	金属加强构件光纤带骨架填充式铝聚乙烯粘结护套通信光缆	
GYTS	金属加强构件松套层绞填充式钢聚乙烯粘结护套通信光缆	
GYXTW	金属加强构件中心管填充式夹带钢丝钢聚乙烯粘结护套通信光缆	
GYTY53	金属加强构件松套层绞填充式聚乙烯内护套皱纹钢带铠装聚乙烯护套通信光缆	
GYTA53	金属加强构件松套层绞填充式铝聚乙烯粘结护套皱纹钢带铠装聚乙烯护套通信光缆	直埋、架空、管道或隧道等固定敷设
GYGTA53	金属加强构件骨架填充式铝聚乙烯粘结护套皱纹钢带铠装聚乙烯护套通信光缆	
GYTA33	金属加强构件松套层绞填充式铝聚乙烯粘结护套细圆钢丝铠装聚乙烯护套通信光缆	水下、竖井或直埋等固定敷设（铝护套极少应用）
GYL33	金属加强构件松套层绞式铝套细圆钢丝铠装聚乙烯护套通信光缆	
GYL03	金属加强构件松套层绞式铝套聚乙烯护套通信光缆	直埋、管道或隧道等固定敷设（铝护套极少应用）
GYL23	金属加强构件松套层绞式铝套钢带铠装聚乙烯护套通信光缆	
GYFV	非金属加强构件松套层绞式聚氯乙烯护套通信光缆	有强电磁干扰架空或室内固定敷设
GYFJV	非金属加强构件紧套层绞式聚氯乙烯护套通信光缆	
GYFTY	非金属加强构件松套层绞填充式聚乙烯护套通信光缆	有强电磁干扰架空或管道固定敷设

4.7　光缆的光学和传输特性

常用的石英多模渐变型光纤和单模光纤的特性已标准化，表 5.6-80～表 5.6-83 列出国际电信联盟电信标准化部（ITU—T）及一些厂商对光纤特性的建议值。在 1550nm 至

1600nm波长区间使用最佳的色散位移光纤，ITU—T建议1550 nm波长下模场直径为(7.0～8.3)μm±10%，模场同心度误差不超过1μm；截止波长小于1270nm；零色散波长的变化范围 $\Delta\lambda \leqslant 50$ nm，零色散斜率 $S_0 \leqslant 0.085$ps/(nm² · km)，在1525nm和1575nm之间的最大总色散系数不大于35ps/(nm · km)。在1550nm波长下的衰减常数ITU—T建议一般应小于0.5dB/km，有的规定不大于0.25dB/km。对于1550nm波长下衰减最小的单模光纤，ITU—T建议1550nm波长下模场直径为10.5μm±10%，同心度误差不超过1μm；衰减常数应小于0.22dB/km；最大总色散系数和零色散斜率分别为20ps/(nm · km)和0.06ps/(nm² · km)。

表 5.6-80　　50/125μm多模渐变型光纤的几何特性

参　数	芯径（μm）	包层外径（μm）	偏心度（%）	芯不圆度（%）	包层不圆度（%）
建议值	50±3	125±3	<6	<6	<2

表 5.6-81　　多模渐变型光纤的光学特性

参　数	折射率分布	最大理论数值孔径
建议值	近于抛物线	(0.18～0.24) ±0.02

表 5.6-82　　多模渐变型光纤的传输特性的分类

参　数		建　议　值								
		850nm				1300nm				
衰减常数	分类	1	2	3	4	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
	dB/km	≤4	≤3.5	≤3.0		≤3	≤2	≤1.5	≤1.0	≤0.8
模式畸变带宽	分类	1	2	3	4	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
	MHz · km	≥200	≥500	≥800	≥1000	≥200	≥500	≥800	≥1000	≥1200

表 5.6-83　　1310nm波长使用最佳的单模光纤主要特性

参　数	模场（1310nm）		包　层		截至波长（nm）	衰减常数		总色散系数	
	直径（μm）	偏心度（μm）	直径（μm）	不圆度（%）		1310（nm）	1550（nm）	波长（nm）	要求 ps/(nm · km)
建议值	9～10 ±10%	≤1	125 ±2.0	<2	1100<λ	<0.35	<0.25	1288～1339	≤3.5
					λ<1280	<0.40	<0.35	1271～1360	≤5.3
					或 $\lambda_{cc} \leqslant 1270$	<0.50dB/km	<0.40dB/km	1550	≤20.0

4.8　光缆的力学性能

光缆的力学性能包括抗拉伸、压扁、冲击、反复弯曲、扭转、曲挠、钩挂、弯折、卷绕、振动等内容，其中以抗拉伸、压扁、冲击、反复弯曲和扭转等5项最为重要。表5.6-84和表5.6-85分别列出了常用几种光缆对抗拉伸和压扁性能的要求。对抗冲击、反复弯曲和扭转性能的要求则需根据光缆的结构和尺寸进行具体规定。

表 5.6-84　　光缆的抗拉伸性能要求

光缆敷设类别	允许短暂拉伸力（N）	允许长期拉伸力（N）	允许短暂拉伸力（N）（1km光缆重量）
管道和架空	≥1500	≥600	≥0.8
直埋	≥3000	≥1000	≥0.8
水下	≥10 000	≥4000	≥1.2

表 5.6-85　　光缆的抗压扁性能要求

光缆敷设类别	允许短暂压扁力（N/100mm）	允许长期压扁力（N/100mm）
管道和架空	≥1000	≥600
直埋	≥3000	≥1000
水下	≥5000	≥4000

4.9　光缆的环境性能

（1）光纤衰减温度特性在规定的适用温度范围内，光缆中光纤因温度变化相对20℃所产生的平均附加衰减应符合表5.6-86的规定。

表 5.6-86　　允许的平均附加衰减

适　用　温　度		附加衰减（dB/km）	
代　号	℃	单模光纤	多模光纤
A	−40～+40	≤0.1	≤0.2
B	−30～+40		
C	−20～+50		
D	−5～+60		

（2）护套的完整性对非填充式光缆的护套，按表5.6-87的规定充入干燥的空气或氮气，在规定保持的时间内，气压不应下降。对填充式光缆的铝带聚乙烯粘结护套，或金属护套及铠装层的塑料外护套应经受直流或工频火花试验不击穿，试验电压见表5.6-88。

（3）抗渗水性对填充式光缆缆芯的空隙应由胶状物连续充满，在20℃±5℃温度下，1m高水柱加到3m试样的缆芯上经24h后，在试样的另一端应无水渗出。

表 5.6-87　　护套气压试验要求

护　套　型　式	充气均衡后相对气压（kPa）	保持时间（h）	
		无铠装	有铠装
塑料护套铝塑综合护套	50～100	≥2	≥5
铝护套	300	≥3	≥6

表 5.6-88　　火花试验要求

试验类型	铝带聚乙烯综合护套	防腐蚀护套	
	试验电压(kV)	试验电压(kV)	试验电压(kV)
直流(工频)	≥12(≥8)	9倍 t(6倍 t)	25(15)

注　t 为护套厚度（mm）。

4.10　几种常用光纤的性能数据

上述光纤性能属于光纤发展中期阶段的水平，标准也未完全成熟，有的数值仅作为建议。目前光纤制造技术已达到较高水平，各项性能有所提高，常用光纤的性能数据可参考表 5.6-89 和表 5.6-90。

表 5.6-89　常用二氧化硅系渐变型多模光纤的性能技术指标

项　　目	二氧化硅系渐变型多模光纤	
	Ala,ITU—TG.651	Alb,ITU—TG.651
光纤几何尺寸		
芯直径(μm)	50±2.5	62.5±2.5
包层直径(μm)	125±2	125±2
芯/包同心度误差(μm)	≤1.5	≤1.5
芯不圆度(%)	≤6	≤6
包层不圆度(%)	≤2	≤2
涂覆层直径(未着色)(μm)	245±10	245±10
最大衰减(dB/km)		
850nm	2.4～3.5	2.8～3.5
1300nm	0.7～1.5	0.7～1.5
最小模式带宽(MHz)		
850nm	200～800	200～800
1300nm	200～1000	200～1000
数值孔径	0.20±0.02 或 0.23±0.02	0.275±0.015
强度筛选(100kpsi 或 1%应变)(GPa)	≥0.7	≥0.7
光纤环境性能(nm)		
[(－60～＋85)℃]	1310 和 1550	1310 和 1550
产生的附加衰减(dB/km)	≤0.05	≤0.05

4.11　光缆的接续

光缆的接续包括光纤的连接和光纤接头的保护。为了得到优良的光纤接头，首先必须制备平整且与光纤轴线垂直的光纤端面，再将被接光纤的端头在接头设备上精密对准，随后再进行光纤接续。光纤的对准通常有 3 种方法：第 1 种是以包层为参考表面的机械对准法；第 2 种是调节被接光纤端头的相对位置，使输出光功率最大的方法；第 3 种是被接光纤轴线对准的方法。光纤的接续基本上采用电弧熔接法，多模光纤和单模光纤固定接头的衰减均已达到 0.1dB 的水平，单模光纤接头的平均衰减一般都小于 0.05dB。为了保证光纤固定接头的机械强度，熔接后的接头应该增强处理，处理的方法有模铸法和热收缩套管法，其中以热收缩套管法使用最普遍，性能也较好。新近出现了快速的机械接头法，接头平均衰减已小于 0.2dB，制作一个接头的时间只需要 2～3min，这对大芯数光缆的接续是非常有利的。近年来光纤接头技术发展很快，如使用微机控制连接器，光纤端头可自动对准、自动熔接和自动显示衰减。此外多根光纤同时熔接和光纤带中所有光纤一次同时熔接的技术均已解决。

类似通信电缆的接续，光缆的接头保护根据需要采用直通型连接盒或分支型连接盒，而连接盒又有机械密封式和非机械密封式 2 种。此外为了与机架相连接，在光缆线路的端头还配有光缆终端分纤盒。连接盒的尺寸应使盒内光纤的弯曲半径符合规范的要求，同时光纤应留有余长，以备维修重接。

表 5.6-90　常用非色散和非零色散位移单模光纤的性能技术指标

项　　目	非色散位移单模光纤				非零色散位移单模光纤
	B1.1，ITU—TG.652.A，B		B1.3，ITU—TG.652.C，D		B4，ITU—TG.655
光纤几何尺寸					
模场直径（μm）	9.3±0.5（1310nm）				(9.0－10.6) ±10%（1550nm）
	10.5±0.8（1550nm）				
包层直径（μm）	125±1				125±1
模场同心度误差（μm）	≤0.8				≤0.8
包层不圆度（%）	≤2.0				≤2.0
涂覆层直径（未着色）（μm）	245±10				245±10
包层/涂覆层同心度误差（μm）	≤12.5				≤12.5
衰减常数（dB/km）	A 级	B 级	A 级	B 级	—
1310nm ≤	0.36	0.40	0.36	0.40	—
1383nm±3nm ≤	—	—	0.36	0.40	—
1550nm ≤	0.22	0.25	0.26	0.30	0.22
1625nm ≤	0.27	0.30	0.30	0.35	0.25
衰减点不连续性（dB）	1550 nm 或 1625 nm		1310 nm 和 1550 nm		—
	≤0.1		≤0.1		≤0.1
宏弯损耗（半径 30mm 圆棒上	1550nm		1550nm 或 1625nm		1550nm
松绕 100 圈测量）（dB）	≤0.5		≤0.5		≤0.2
色散					
零色散波长范围(λ_0)(nm)	1300～1324		1300～1324		—
零色散斜率(S_0)[ps/(nm^2 · km)]	≤0.093		≤0.093		—
色散系数绝对值[ps/(nm · km)]					色散系数绝对值
1288～1339nm	≤3.5		≤3.5		$1.0 \leqslant \lvert D(\lambda) \rvert \leqslant 10$
1271～1360nm	≤5.3		≤5.3		$D_{max} - D_{min} \leqslant 5.0$
1550nm	≤18.0		≤18.0		(1530～1565nm)

续表

项 目	非色散位移单模光纤		非零色散位移单模光纤
	B1.1，ITU—TG.652.A，B	B1.3，ITU—TG.652.C，D	B4，ITU—TG.655
偏振模色散（$(km)^{1/2}$） ≤	A子类 0.5ps B子类 0.20ps	C子类 0.5ps D子类 0.20ps	A，B子类 0.5ps C子类 0.20ps
光纤截止波长 $(\lambda_c)^2$（nm）	1170～1330	1170～1330	—
光缆截止波长 $(\lambda_{cc})^2$（nm）	<1260	<1260	≤1480
强度筛选（100kpsi或1%应变）（GPa）	≥0.7	≥0.7	≥0.7
光纤环境性能（nm）	1310和1550	1310和1550	1310和1550
（−60℃～+85℃产生的附加衰减）	≤0.05	≤0.05	≤0.05

注 测试光纤时试样为2m长光纤，测试光缆时试样为20m长光缆+2m长光纤。

4.12 光缆的试验

光缆的试验包括例行试验和型式试验，光缆的品种很多、结构复杂，经常包括光和电二种独立的功能，因此光缆试验项目并不像其他产品比较容易统一，但要求检验的基本项目与有关电线电缆产品有相似之处，如尺寸检验、电压试验和热老化试验等，对于这些试验项目本节从略。但另一方面，有些试验条件对成品光缆中的光纤性能需要检测，这是为保证光纤的正常传输特性，例如光纤复合架空地线（OPGW）和光纤复合电力电缆发生短路电流事故时，瞬间温度可达到250℃，光纤也应能适应；海底光缆在径向高水压下需保证其使用寿命；有的需承受很大的拉力；有的要经常弯曲，因此光缆的型式试验显得特别严格。一般通信光缆中光纤的主要试验项目有：光纤尺寸测量、光纤光学及传输特性、力学和环境因素的影响。光纤尺寸测量所包括的项目和采用的测量方法见表5.6-91。测量细节参见表中列出编号的国家标准或ITU—T建议，表中还列出了基准方法和代用方法。光纤的光学及传输特性测量所包括的内容及测量方法见表5.6-92。光缆力学性能试验的主要内容及试验方法见表5.6-93。光缆环境性能试验的主要内容及试验方法见表5.6-94。特殊的试验要查阅产品标准。

表5.6-91 光纤尺寸参数测量

项 目		测量方法		
		名 称	等 级	参考标准和建议
多模光纤	纤芯直径 纤芯不圆度	折射近场法	基准方法	GB 8402.2
	包层直径 包层不圆度 纤芯/包层 同心度偏差	近场法	代用方法	GB 8402.3
单模光纤	模场直径	远场扫描法	基准方法	ITU—T G650
		可变孔径法	第一代用方法	
		近场扫描法	第二代用方法	
	包层直径 包层不圆度 纤芯/包层 同心度偏差	传输近场法	基准方法	ITU—T G650
		折射近场法	第一代用方法	
		侧视法	第二代用方法	
		传输近场成象法	第三代用方法	

表5.6-92 光纤的光学及传输特性测量

项 目		测量方法		
		名 称	等 级	参考标准和建议
多模光纤	折射率分布	折射近场法	基准方法	GB 8401.9
		近场法	代用方法	GB 8401.10
	数值孔径	近场法	基准方法	GB 8401.11
		折射近场法	代用方法	GB 8401.9
	衰减	剪断法	基准方法	GB 8401.2
		后向散射法	代用方法	GB 8401.4
		介入损耗法	代用方法	GB 8401.3
	模式畸变带宽	频域法	基准方法	GB 8401.5
		时域法	基准方法	GB 8401.6
单模光纤	截止波长 λ_c	远场扫描法	基准方法	ITU—T G650
		可变孔径法	第一代用方法	
		近场扫描法	第二代用方法	
	截止波长 λ_{cc}	传输功率法	基准方法（成缆光纤） 代用方法（非成缆光纤）	ITU—T G650
	衰减	剪断法	基准方法	GB 8401.2
		后向散射法	第一代用方法	GB 8401.4
		介入损耗法	第二代用方法	GB 8401.3
	色散	相移法	基准方法	GB 8401.7
		干涉法	第一代用方法	ITU—T G650
		脉冲时延法	第二代用方法	GB 8401.8

表5.6-93 光缆的力学性能试验

项 目	试验方法	
	名 称	参考标准
抗拉伸	拉伸法	GB 7425.2
抗压扁	压扁法	GB 7425.3
抗冲击	冲击法	GB 7425.4
抗弯曲	反复弯曲法	GB 7425.5
抗扭转	扭转法	GB 7425.6

表5.6-94 光缆的环境性能试验

项 目	名 称	参考标准
光纤衰减温度特性	温度循环法	GB 7425.2
护套完整性	充气法	GB 7425.3
	火花检验法	GB 7428.10
抗渗水性	渗水检验法	GB 7425.4

参 考 文 献

[1] 王春江. 电线电缆手册(第一册)[M]. 第二版. 北京：机械工业出版社，2001.

[2] 徐应麟. 电线电缆手册(第二册)[M]. 第二版. 北京：机械工业出版社，2001.

[3] 印永福. 电线电缆手册(第三册)[M]. 第二版. 北京：机械工业出版社，2001.

[4] 汪志远. 中国机电产品目录电线电缆[M]. 第 16 册(上、下册). 北京：机械工业出版社出版，2000.

[5] 汪志远. 电线电缆产品手册[M]. 北京：机械工业出版社出版，2004.

[6] 汪志远. 电线电缆材料技术要求总汇 2002 新编版[M]. 上海：上海电缆研究所信息中心组编. 2002.

[7] 马国栋. 电线电缆在流量[M]. 北京：中国电力出版社出版，2003.

[8] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆标准汇编：制造设备与装备装备卷[S]. 第一版. 北京：中国标准出版社，2003.

[9] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆标准汇编：电力电缆及附件卷[S]. 第一版. 北京：中国标准出版社，2003.

[10] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆标准汇编：装备用电线电缆卷[S]. 第一版. 北京：中国标准出版社，2003.

[11] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆标准汇编：裸线卷[S]. 第一版. 北京：中国标准出版社，2003.

[12] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆标准汇编：船用电缆卷[S]. 第一版. 北京：中国标准出版社，2003.

[13] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆标准汇编：绕组线卷[S]. 第一版. 北京：中国标准出版社，2003.

[14] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆标准汇编：通信电缆、光缆及附件卷[S]. 第一版. 北京：中国标准出版社，2003.

[15] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆标准汇编：基础与试验方法卷[S]. 第一版. 北京：中国标准出版社，2003.

[16] 上海电缆研究所. 电线电缆标准集[S]. 第 15 册. 上海：上海电缆研究所，2000.

[17] 上海电缆研究所. 电线电缆标准集[S]. 第 16 册. 上海：上海电缆研究所，2002.

[18] 上海电缆研究所. 电线电缆标准集[S]. 第 17 册. 上海：上海电缆研究所，2003.

[19] 上海电缆研究所. 电线电缆标准集[S]. 第 18 册. 上海：上海电缆研究所，2005.

[20] 上海市电机工程学会电工技术学会电工材料专委会. 2000 年变频电机与其材料及阻燃和耐火电缆与其材料论文集[C]. 上海：上海市电机工程学会电工技术学会电工材料专委会，2000

[21] 中国电线电缆行业大会. 导体与装备技术研讨会论文集[C]. 上海：中国电工技术学会电线电缆分会专委会、中国电器工业协会电线电缆分会、上海电缆研究所联合主办，2003.

[22] 中国电器工业协会. 电线电缆第六届一次输电导电地线学术年会论文集[C]. 重庆：2006.

[23] 中国电线电缆行业大会. 绿色环保—可持续发展会论文集[C]. 上海：中国电器工业协会电线电缆分会、上海：电缆研究所，2003.

[24] 中国国际线缆及线材学术研讨会，有色金属论文集[C]. 上海：上海电缆研究所和国际线材机械协会联合主办，2004.

[25] 中国电工技术学会 2004 年会. 电线电缆分会专委会论文集[C]. 江苏：2004.

[26] 中国电器工业协会电线电缆分会. 电缆材料面向《十一·五》发展与应用技术研讨会论文集[C]. 云南：2005.

[27] 中国电工技术学会电线电缆分会专委会. 2006 年会论文集[C]. 江苏：2006.

[28] 中国电线电缆行业大会. 核电站用电缆、材料及分析评估技术研讨会论文集[C]. 上海：中国电器工业协会电线电缆分会，2006.

[29] 陈铭. 环保型电线电缆产品标准集[M]. 上海：上海电缆厂标准情报室.

[30] 马国栋. 电缆(电线)连续负荷载流量[M]. 上海：电缆研究所，1994.

第6篇 电 池

主编单位：中国电子科技集团公司第十八研究所
主　　编：汪继强
编写人员：张建中　孙彦铮　徐寿岩　毕道治
（中国电子科技集团公司第十八研究所）

电池是化学或物理电源的代名词。一般由化学能直接转换为电能的装置称为化学电源，又称为电化学电池或电池；由光能直接转化为电能的器件或装置和由热能直接转换为电能的器件或装置则属于物理电源，前者即是太阳电池，后者一般称为温差发电器，也称之为“热电转换型热电池”。

当今，化学或物理电源已广泛应用于卫星、载人飞船、军事武器与装备和国民经济（如通信、交通运输和工业自动化等）以及人民日常生活等各个领域和各个方面。20 世纪 90 年代，信息技术的飞速发展，特别是移动通信及便携式计算机等的迅速发展，极大地推动了电池技术的发展，不仅推动了电池技术向无污染、小型化、轻型化、长服务时间、长工作寿命和免维护的方向进步，而且使电池市场不断扩大和增长。

自 2000 年始步入 21 世纪以来，化学或物理电源已经成为世界关注的一个“新能源”重大技术发展领域，这是在环保呼声日益高涨、天然化石能源日益枯竭的背景下提出的。一般而言，太阳能和氢能（可取之水中，而氢与氧反应又回到水）等被认为是地球上取之不尽的清洁能源；同时，由于太阳能需要配以贮能体系（无光照时供电），因此高效、长寿命贮能电池便成为新能源领域中的一个重要组成部分。事实上，利用太阳能直接发电，即是太阳电池；利用氢能直接发电，即是燃料电池；利用化学能直接贮能或发电，即是蓄电池（含超级电容贮能）。由于新近发展起来的金属氢化物镍蓄电池（以下简称氢镍电池）和锂离子蓄电池（以下简称锂离子电池）等是无毒和不污染环境，故又被人们称为绿色电池。

以上三种化学或物理电源体系将构成 21 世纪最有发展和应用前景的新型绿色能源体系。它们又被人们称为新型绿色电池。

第 1 章　概　　述

1　电池和电池组的组成

电池是化学电源的简称，它是将物质的化学能通过电化学氧化还原反应直接转换成电能的一种装置或系统。图 6.1-1表示电池是由三个主要部分组成的，电池的电化学过程说明如下：

（1）负极（或称阳极）在电化学反应时，向外电路释放电子，自身被氧化。

（2）正极（或称阴极）在电化学反应时，从外电路接受电子，自身被还原。

（3）电解质是一种离子导体，离子可以在电池内的正、负极之间移动，实现电荷（以离子形式表现）的转移。

在上述电化学过程中，电池便向负载提供电压和电流，即输出了电能。在实际电池中，正极和负极之间还应有隔膜，电池还应有壳体和带有正负极柱的盖子等，以构成一个完整的电池。根据实际应用的需要，电池的形状和结构可以是各种各样的，如圆柱型、扣式、扁平和方型等。

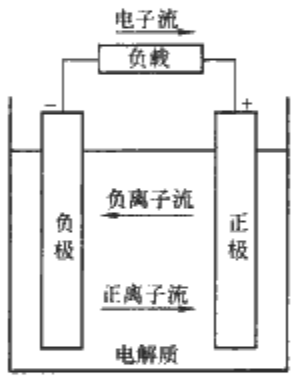


图 6.1-1　电池的基本组成和电化学过程(放电)

由图 6.1-1 看出，电池产生电能的反应过程包含着电子通过外部电路从一个电极材料转移到另一个电极材料的过程。与此不同，非电化学氧化还原反应，如金属生锈或燃料燃烧反应，（两种电极材料之间）直接发生电子的转移，则仅产生热效应（不能输出电能）。同时与热机（发电）不同，当电池将化学能转换成电能时，可以避开由热力学第二定律“卡诺循环”的限制，从而使电池能够显示高的能量转换效率。

电池是一个基本的电化学单元，即单体电池。电池组则是由一个或一个以上单体电池组成。一般是根据使用要求的电压和容量，将一定数量单体电池以串联或并联、串并联的形式连接成实用的电池组。

2　电池的分类

从使用角度考虑，则将化学电源分类为原电池（又称一次电池），蓄电池（又称二次电池），贮备电池和燃料电池。

2.1　原电池

原电池也称一次电池。在原电池使用过程中，电池中的活性物质通过化学反应逐步消耗尽，由于这类反应是不可逆的，因此不能通过充电回复到反应前的状态。采用吸收剂或隔膜吸收电解液（不存在自由电解液）的原电池通常又俗称为“干电池”。

2.2　蓄电池

蓄电池又称二次电池或可充电电池或贮能电池，即可以反复充放电的电池。在这种电池使用过程中，由于电池反应是可逆的，因此放电结束后，外加上适当的充电电源为其充电，便可使电池回复到原先的状态。

某些称为“机械再充电方式的电池”是通过更换放完电或报废了的电极使其达到“再充电”，通常是采用一个新金属负极更换已耗尽的金属负极，一些金属/空气电池就是这类电池的代表。

2.3　贮备电池

贮备电池亦称“激活电池”，即电池在使用前处于惰性状态，因而该类电池能长时间贮存。投入使用前采取一些特定的激活方式使电池迅速活化进入工作状态。

2.4　燃料电池

燃料电池是一种不经过燃烧直接以电化学反应方式在等温条件下将燃料化学能连续转化为电能的高效洁净发电装置。输出的电能是化学反应焓和系统热量变化的净效应，它的能量转化效率不受卡诺循环限制。与常规化学电源不同，其燃料和氧化剂贮存在储罐中，当发电时，连续不断向电堆输入燃料与氧化剂。

燃料电池的电极材料是惰性的，在电池反应过程中不被消耗，但它具有催化特性，能增强反应物的电化学还原和电化学氧化的活性。

3　电池的主要性能参数及相关术语

电池作为提供电能的装置，其主要性能参数有电压、容量（电流与时间的乘积）、输出能量和输出功率，同时由于电池多用作移动电源，因此其比特性非常重要，这就包括比能量（质量比能量和体积比能量）和比功率（质量比功率和体积比功率）。此外，这些电池若需要在各种不同环境条件下工作，必须知道电池在这些条件下的性能（例如在低温和高温下的性能变化等）。关于电池的电压、容量、能量与比能量以及功率与比功率都有相应的标准术语规定，以下分别予以说明。

3.1　容量

电池的容量是电池在规定条件下释放出的电量，以安时（Ah）表示。电池容量可区分为理论容量、额定容量、标称容量和实际容量。

3.1.1　理论容量

电池的理论容量是由电池中的活性物质量决定，以电化学反应中的总电量来表示，并采用 Ah 为单位。理论上每当量物质将放出 96.847C 或 26.8Ah 电量（当量是活性物质的摩尔质量除以包含在反应中的电子数），若换算成单位电量下的质量和体积，就是其电化当量。典型电池正负极活性物质的的电化当量如表 6.1-1 所列。

由于不同电池体系的理论容量只与参加电池中电化学反应的活性物质有关，因此可以按表 6.1-1 中的反应物的电化当量来进行计算。以 Zn/空气（O_2）和 Zn/Cl_2 两个电池体系为例，由表 6.1-1 得到的相应锌、氧和氯的电化当量，按

表 6.1-1 典型电池正负极活性物质的电化当量（分别以质量计和以体积计）

负极活性物质	电化当量	
	(g/Ah)	(cm^3/Ah)
Li（固体）	0.259	0.485
Al（固体）	0.336	0.124
Mg（固体）	0.453	0.260
Na（液体）	0.858	0.923
Fe（固体）	1.042	0.133
Zn（固体）	1.220	0.171
Cd（固体）	2.097	0.243
Pb（固体）	3.866	0.341
H_2（气体）	0.038	4.61×10^2
CH_3OH（液体）	0.199	0.252
正极活性物质	**电化当量**	
	(g/Ah)	(cm^3/Ah)
S（固体）	0.598	0.298
$(CF)_n$（固体）	1.157	0.391
AgO（固体）	2.310	0.235
MnO_2（固体）	3.244	0.309
NiOOH（固体）	3.422	0.645
Ag_2O（固体）	4.322	0.492
PbO_2（固体）	4.462	0.600
$SOCl_2$（液体）	1.664	1.016
O_2（气体）	0.298	2.28×10^2
Cl_2（气体）	1.323	4.49×10^2

照下列反应式就可直接计算得到相应电池的理论比容量，即

$$2Zn+O_2 \longrightarrow 2ZnO$$

1.22g/Ah+0.298g/Ah=1.518g/Ah 或 0.61Ah/g

$$2Zn+Cl_2 \longrightarrow 2ZnCl$$

1.22g/Ah+1.323g/Ah=2.543g/Ah 或 0.394Ah/g

3.1.2 额定容量

电池在特定条件下（在规定的放电倍率、终止电压和温度等条件下）可以放出的最低容量（Ah）。该值通常由制造商规定，并在产品规格书中或电池上加以说明或标识。

3.1.3 标称容量

用来鉴别电池适当的近似的安时电量。对于蓄电池而言，通常是指在指定条件下，以 0.2C* 放电时获得的容量值。

C* 是放电或充电（倍）率，即以安培（A）为单位的电池放电电流或充电电流，表示为额定容量安时（Ah）数的倍数

$$I=MCn$$

式中：I 为电流，A；C 为电池容量额定值，Ah；n 为放出额定容量的小时数；M 为 C 的倍数或其分数。

例如，0.2C 或 $C/5$ 放电电流下获得额定容量为 5Ah 的电池，以 0.05C 或 $C/20$ 的放电电流应为 250mA，即

$$I=M\times C_{0.2}=0.05\times5=0.250A$$

相反地，一个在 0.5C 或 $C/2$ 放电电流下获得额定容量为 300mAh 的电池，以 30mA 放电，放电率为 0.1C 或 $C/10$，计算如下

$$M=I/C_{0.5}=0.030/0.300=0.1 \text{ 或 } C/10$$

3.1.4 实际容量

电池在实际使用条件下（在使用的放电倍率、终止电压和温度等条件下）工作时，实际放出的容量。在电池以恒定电流放电时，电池的实际放电容量就等于电流与工作时间的乘积（It）。

一般电池的实际容量都远低于其理论容量，影响电池实际容量的主要因素有：

（1）构成电池正、负极活性物质的量及其利用程度既活性物质的利用率。活性物质利用率指某一容量的电池按法拉第定律计算的理论上应消耗活性物质的量与实际上的使用活性物质量的比值。

（2）放电条件。主要指放电速率、放电制度（恒电流或恒电阻，连续获间歇）、采取的终止电压和环境温度等。

（3）电极结构和组成。包括电极高与宽的比例，厚度，孔隙率，导电栅网的形式以及导电添加剂，催化剂的比例等。

（4）制造工艺。制造电池的材料与工艺对电池性能的影响都很大。

3.2 电压

3.2.1 理论电压

电池电化学体系的电动势，即电池的理论电压由正、负电极的电位差确定的，如式（6.1-1）所示

$$E(\text{电动势})=E_+-E_- \qquad (6.1\text{-}1)$$

式中：E_+ 和 E_- 分别为正极和负极的电极电位。

在标准状态下（25℃下、氧化态与还原态的活度皆为 1），式（6.1-1）可表示为

$$E^0(\text{电动势})=E^0_+-E^0_- \qquad (6.1\text{-}2)$$

电池电化学体系的标准电动势（E^0）可从自由能公式来计算，如一个电化学电对体系在标准状态下的自由能变化可表示为

$$\Delta G^0=-nFE^0 \qquad (6.1\text{-}3)$$

式中：F 为法拉第常数（≈96 500C/mol 或 26.8Ah/mol）；n 为参加反应的电子数；E^0 为标准电动势，V。

若知道 ΔG^0 的数值，由公式（6.1-2）可以计算出 E^0 值。但是事实上，电池体系在标准状态下的电动势（即标准状态下的理论电池电压）可以通过查出相应电极的标准电极电位后，直接根据公式（6.1-1）计算得到。表 6.1-2 表示出典型电池正负极反应的标准电极电位。

以锌/氯电池为例，其电池反应为 $Zn+Cl_2\rightarrow ZnCl_2$，由表 6.1-2 查出两个电极的标准电极电位分别是

$$Zn \longrightarrow Zn^{2+}+2e \qquad -(-0.76V)$$

$$Cl_2+2e \longrightarrow 2Cl^- \qquad 1.36V$$

故电池标准电动势（标准理论电压）为

$$E^0=2.12V$$

再以传统铅酸电池为例：其电池反应为 $Pb+PbO_2+2H_2SO_4=2PbSO_4+2H_2O$，由表 6.1-2 查出两个电极的标准电极电位分别是

$$Pb+SO_4^{2-} \rightleftharpoons PbSO_4+2e \qquad -(-0.355V)$$

$$PbO_2+SO_4^{2-}+4H^++2e \rightleftharpoons PbSO_4+2H_2O(\alpha_{H_3O^+}=1)$$

1.685V

故电池标准电动势（标准理论电压）为

$$E^0=2.040V$$

在实际条件下的电池体系电动势与温度及电解质的活度有关，可通过能斯特方程式计算得到，即

$$E=2.047+\frac{RT}{F}\ln\left(\frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}}\right)$$

将实际采用的硫酸与水的活度（H_2SO_4 和 H_2O 都参与反应）以及相应的温度代入公式，即可得到电池在实际条件下的铅酸电池的电动势或理论电压。

表 6.1-2　典型电池正负极反应的标准电极电位

负极电化学反应	标准电极电位（V）	正极电化学反应	标准电极电位（V）
$Li=Li^++e$	−3.040	$Cu^{2+}+2e=Cu$	0.347
$Al=Al^{3+}+3e$	−2.714	$Ag^++e=Ag$	0.799
$Mg=Mg^{2+}+2e$	−2.37	$CuCl+e=Cu+Cl^-$	0.137
$Na=Na^++e$	−1.68		
$Zn+4OH^-=ZnO_2^{2-}+2e+2H_2O$ ($a_{OH^-}=1$)	−1.22	$MnO_2+H_2O+e=2MnOOH+OH^-$ ($a_{OH^-}=1$)	0.15
$Cd+2OH^-=Cd(OH)_2+2e$ ($a_{OH^-}=1$)	−0.825	$NiOOH+H_2O+e=Ni(OH)_2+OH^-$ ($a_{OH^-}=1$)	0.49
$Zn=Zn^{2+}+2e$	−0.76	$Cl_2+2e=2Cl^-$	1.36
		$MnO_2+4H^++e=Mn^{2+}+2H_2O$ ($a_{H_3O^+}=1$)	1.23
$Pb+SO_4^{2-}=PbSO_4+2e$	−0.355	$PbO_2+SO_4^{2-}+4H^++2e=PbSO_4+2H_2O$ ($a_{H_3O^+}=1$)	1.685
$Cr^{3+}=Cr^{2+}+e$	−0.424	$Fe^{3-}+e=Fe^{2+}$	0.771
$H_2+2OH^-=2H_2O+2e$ ($a_{OH^-}=1$)	−0.828	$O_2+2H_2O+4e=4OH^-$ ($a_{OH^-}=1$)	0.401
$H_2=2H^++2e$ ($a_{H_3O^+}=1$)	0.000	$O_2+4H^++4e=2H_2O$ ($a_{H_3O^+}=1$)	1.229

3.2.2　开路电压

电池在处于电路断开时（无负载条件），其正负极柱之间的电压差就是电池的开路电压。

3.2.3　标称电压

用来鉴别电池类型的适当的电压近似值。例如锌/二氧化锰和锌/氧化银电池的标称电压都是 1.5V，而其开路电压一般都高于此电压；锂/二氧化锰电池的标称电压为 3V，其开路电压一般在 3.2～3.5V 区间。

3.2.4　工作电压

放电（或充电）期间电池的实际得到的典型电压或电压范围，如典型的电池放电曲线示意图（图 6.1-2）所示。

3.2.5　平均电压

电池放电（或满充电）期间的电压平均值，如典型的电池放电曲线示意图（图 6.1-2）所示。

3.2.6　终止电压

认为电池放电（或充电）达到终止（或满充电）时的电压，如典型的电池放电曲线示意图（图 6.1-2）所示。

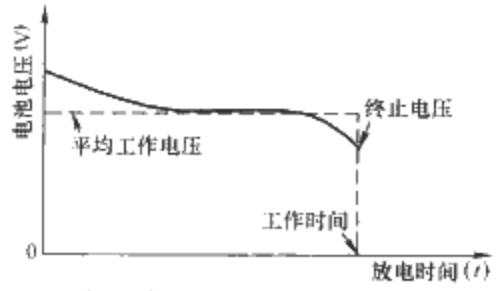


图 6.1-2　电池或电池组的典型放电曲线示意图

3.3　能量和比能量

3.3.1　理论能量和理论比能量

电池电动势与理论容量的乘积就是电池的理论能量。以单位质量和体积计量的电池能量，分别称为质量比能量和体积比能量。理论比能量值则是一特定电化学体系可提供的最大值，它可以通过电池的理论比容量与电动势直接计算得到。

例如在 Zn/Cl_2 和 Zn/O_2 电池中，如果标准电压分别取 2.12V 和 1.229V，两个体系电对活性物质的理论质量比能量则分别为

Zn/Cl_2 电池

2.12V×0.394Ah/g=0.835Wh/g 或 835Wh/kg

Zn/O_2 电池

1.621V×0.61Ah/g=0.989Wh/g 或 989Wh/kg

3.3.2　实际能量和实际比能量

由图 6.1-2 可以按照规定的终止电压值，从放电曲线上确定电池的有效工作时间（t）和平均工作电压（$\overline{V}$）。若工作时的放电电流为 I，则可得到另外两个重要的电池性能参数。

输出能量

$W=I\overline{V}t$（其中 It 即是实际容量）

若电池的质量为 m，体积为 v，则，

电池的质量比能量为

W/m

体积比能量为

W/v

实际上电池一旦放电，其工作电压就会低于开路电压，这种现象在电化学上称为极化。其中包括电化学极化（或活化极化）、浓差极化和电阻极化（IR 损耗）三种类型。一般工作电流越低，极化越小，工作电压越接近开路电压。反之，工作电压就与开路电压差距增大，图 6.1-3 所示的电池极化和放电电流之间的关系。

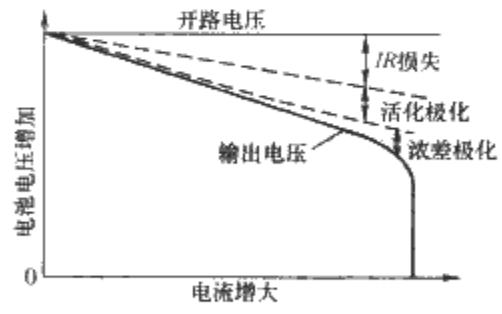


图 6.1-3　电池的极化与放电电流的关系

由于各种因素的影响，电池实际比能量远小于理论比能量，同时也极大地影响到电池的实际输出功率。主要影响因素归纳有如下几方面：

（1）电压效率（η_V）指电池工作电压与电动势（E）的百分比。电池放电时，由于存在电化学极化，浓度极化和欧姆电压下降，所以工作电压小于电池电动势。

$$V=E-|\Delta\Psi_+|-\Delta\Psi_--IR$$

式中：$\Delta\Psi_+$ 为正极极化引起的电压降；$\Delta\Psi_-$ 为负极极化引起的电压降；IR 为由于欧姆阻力引起的电压降。

(2) 电量效率（η_Q）指电池中活性物质的有效利用率。由于副反应的存在及用电器电压的要求，活性物质按法拉第定律提供电量不能完全地有效利用，只能部分被利用。

$$\eta_Q=\frac{\text{活性物质实际上给出的电量}}{\text{活性物质理论上应给出的电量}}\times 100\%$$

(3) 结构效率（η_S）指电池结构的有效利用率。由于电池结构中除能替提供电能的正、负极活性物质外，还必须包括一些不提供电能的结构材料如外壳，接线柱、集流体，隔膜，以及电解质材料等。它们都占据一定的重量和体积，而且是必不可少的，只能尽量减少其所占密度以提高活性物质所占密度。

实际比能量和理论比能量的关系可表示如下

$$\text{实际比能量}=\text{理论比能量}\times\eta_V\times\eta_Q\times\eta_S$$

显然，这些极化不仅造成了部分能量损失并以废热的形式放出，使电极内储存的理论能量并不能都转化成有用的电能；而且极大地影响了电池的输出功率，即由于极化使电池输出功率明显下降，而且极化越大功率输出越低。

再者，实际电池中活性物质往往不是严格按化学计量比匹配，一个电极中多余的活性物质降低了电池的比能量。

在以上因素影响下，常用电池的实际比能量比其理论值有很大差别，考虑电池中所有材料的质量，理论能量密度几乎已经降低了 50%；即使是在接近最佳条件下放电，电池实际输出的能量也仅为上述降低值后的 50%～75%。因此，在接近最佳放电条件下应用时，电池仅能输出活性物质理论能量的 25%～35%，当电池在苛刻条件下使用时，会输出更低的能量。

3.4 功率和比功率

电池的功率指在一定放电制度下，单位时间内电池所输出的能量，单位为 W(瓦)或 kW(千瓦)。单位质量或单位体积电池所输出的功率就称为比功率，分别用 W(或 kW)/kg 或 W(kW)/L 表示。比功率也是电池重要性能参数之一。电池比功率大，表示可以承受更高的电流放电。电池的实际功率也可以通过诸如图 6.1-2 上的实际放电曲线加以计算获得，在恒电流放电时，电压是逐步下降的，因此电池的实际输出功率成相应下降趋势($P=IV$)。但也可以通过下式计算电池的实际平均输出功率与比功率，即

平均输出功率 $P=IV$

若电池的质量为 m，体积为 v，则

平均质量比功率为 P/m

平均体积比功率为 P/v

电池的比能量和比功率密切相关，一般比能量随比功率增大而下降。

4 影响电池性能的因数

许多因素影响电池的工作特性，包括容量、能量输出和功率输出等性能。在讨论影响电池性能的因素时，要特别注意到存在很多可能的相互影响，并且在更严格的工作条件下每一因素影响的程度会更大。例如，不仅高温和长时间贮存会对电池性能产生更加明显的影响，而且在贮存后处于更苛刻条件放电时对性能影响也非常大；类似地，大电流负载比低电流或中等电流负载的低温下放电的容量损失更大。

同时也应注意，对给定电池或设计，制造商不同，或是同一种电池的不同型号(如标准、高功率或特殊用途)，性能都会有差别。即使是同一批电池或批与批之间，由于制造工艺存在的固有差别，电池性能也都会有差别，差别的程度依赖于制造过程控制及电池的使用情况。要获得电池的特定性能，应参考制造商提供的数据。

从电池固有的特点分析加以归纳，主要影响电池实际性能的因数有电池体系本身特点、设计与制造、放电电流、放电制度、放电的环境温度、贮存条件(包括温度、湿度和其他条件)与贮存时间的长短等。

5 电池的选择和应用

5.1 电池的选择

为某一特定应用选择最佳电池时必须考虑多种因素，考虑这些因素时要遵循能选出其中能最大限度满足使用要求的原则，选择电池应该在设备开发初期进行，而不是在设备开发完毕，所有的硬件已经固化时再做，才能使电池性能与设备要求达到最有效的平衡。选择电池时应该考虑以下重要事项。

(1) 电池类型：原电池、蓄电池或贮备电池体系。

(2) 电化学体系：分析优点、缺点以及电池的特点是否与设备主要要求相匹配。

(3) 电压：考虑电池的标称或工作电压、最大最小允许电压、电压精度、放电特性、启动时间和电压滞后的情况。

(4) 负载电流和负载曲线：考虑使用要求的放电制度，是恒电流、恒电阻、恒功率或其他方式，是单一电流负荷，还是可变电流负荷或脉冲电流负荷。

(5) 使用制度：分析是连续使用或是间断使用。

(6) 温度要求：包括工作温度范围储存温度范围等。

(7) 使用寿命：在使用条件下总计要求的工作时间。

(8) 物理要求：电池或电池组的尺寸、形状、质量和极柱形式。

(9) 贮备寿命：对激活/贮备电池体系而言，有干贮备和湿贮备之分，贮存期间的荷电量随贮存时间、温度、湿度和其他条件变化的规律。

(10) 充放电循环（可充式电池）：是浮充使用还是深度循环使用，要求的循环次数或寿命，采用充电电源的实用性和特点以及充电效率等。

(11) 环境条件：对振动、冲击、离心旋转、加速度及大气条件（压力、湿度等）等有何要求。

(12) 安全性和可靠性：在正常情况下、甚至滥用或在危险的条件下工作，是否存在安全与可靠性问题以及其对环境造成的影响。

(13) 不同寻常或苛刻的工作条件：相当长期的或处于极端温度下的贮存、贮备或工作；特殊应用下的高可靠性；贮备电池的快速活化、无电压滞后现象；电池组特殊封装(压力容器等)以及非常规的力学性能要求，如强冲击或加速度、非磁性等。

(14) 维护和补给：电池组易买进、易得到、易发送，易更换，具有充电设备，特殊的运输方式，必须的回收或处置程序。

(15) 成本：初始成本，操作或回收成本（特别是使用危险的或有害材料的高回收成本）。

5.2 电池的应用

电池与其他能源相比具有使用方便、有效、可靠、几乎无须维护和易于设计成用户要求的结构等优点，所以应用领

域极其广泛，从采矿到工业、从医疗到交通、从金融到通信、从航空到航天、从武器到信息装备、从移动电动设备与工具到家用电器，电池的应用无所不在，作用重大。而且它的尺寸大小也多种多样，小至 3mAh 的手表电池和存贮器备用电池，大到 20 000Ah 的潜艇电池和通信用 UPS 电池。近年来每年全球的电化学电池销售额已超过了 500 亿美元。

特别是近年来电池新的应用不断涌现和迅速普及，归因于电子技术的进步使手机、笔记本计算机和数码便携式用电装置（数码相机、摄像机、MP3 等）的问世和不断普及对小型电池的需求量极大地增长；而随着石油等天然能源的大量消耗与价格飞涨、CO_2 排放造成日趋严重的温室效应，使得全世界都加快了替代能源车辆的开发与推广应用。其中油电混合动力车已经开始了商品化，采用电池和燃料电池的电动车辆也正在开发与演示评价中。由此不难看出，对高性能电池的研制与产业化已成为 21 世纪影响人类社会的重大技术发展领域之一。

我国电池产业与市场是我国最活跃的产业和市场之一，由于近几年来我国国民经济持续快速发展，人民生活水平不断提高，极大地推动了我国电池工业和电池市场应用的发展。2000 年我国年生产电池已达 140 亿只，国内消费电池量也达到了 60 亿只。2005 年我国电池行业共生产出 228.78 亿只原电池，24.38 亿只便携式二次电池和 1.5 亿组铅酸电池。显然，我国已经成为世界最大的电池生产与消费市场。

第 2 章 原 电 池

原电池是一类与人民生活息息相关的电池，通常在商店销售的原电池中有圆柱形和扁平形（扣式和钱币形）两种，其中圆柱形原电池包括普通锌/二氧化锰电池（R20、R14 和 R6 等）、碱性锌/二氧化锰电池（LR20、LR14、LR06 和 LR03）和锂电池；扁平形原电池包括碱性锌/二氧化锰、锌/氧化银、锌/空气、锂/二氧化锰电池等。圆柱形普通锌/二氧化锰电池和碱性锌/二氧化锰电池主要用于照明（手电筒等）、电子钟、遥控器、电动玩具、收录机、随身听、照相用闪光灯和 BP 机等；而圆柱形锂电池主要用于中高档照相机等。扣式和钱币形原电池则主要用于电子表和计算器等。显然由于这类电池面向家庭和个人，又是消耗品，因此市场需求量巨大。按数量计，世界原电池产量是各类电池中最多的。2000 年，世界原电池的产量已超过了 500 亿只。

原电池存在已有 100 多年了，但直到 1940 年，得到广泛应用的只有锌/二氧化锰电池一种。在第二次世界大战期间和战后时期，不仅锌/二氧化锰电池体系取得了长足的进步，而且出现了各种新型并具有优越性能的电池。电池比能量在不断提高，由早期锌/二氧化锰电池低于 50Wh/kg，提高至现在锂电池的 400Wh/kg 以上。二次大战时期，电池在适当温度下的贮存寿命只有 1 年。目前的传统电池的贮存寿命是 2～5 年，而新型锂电池的贮存寿命可达 10 年，并能在温度高达 70℃ 下贮存。电池低温工作已从 0℃ 延伸到 −40℃，比功率则显著地成倍增大。同时采用固体电解质的特殊低电流放电电池具有超过 20 年的贮存寿命。

20 世纪 70～90 年代期间受到同时期快速发展的电子技术的激励、对小型电源的新要求以及出于对空间、军事和环境改善计划的支持，在电池领域有了许多显著的进展。

在该期间，碱性锌/二氧化锰电池开始替代普通锌/二氧化锰电池，在原电池中逐步处于了主导地位。进一步对环境的关注则实现了消除大多数电池中的汞，并使电池性能未发生变化；同时也促使锌氧化汞电池和镉/氧化汞电池的退出，因为在这些电池中，汞用作正极活性物质。锌/空气电池和锂电池非常适时地得到发展，并能够在许多应用中替代原先采用的“汞”电池。应该说，一系列锂电池的发展与上市则是这段期间的一个重大成就，在这些锂电池中是采用金属锂作为负极活性物质。这些锂电池可以输出的比能量至少是大多数传统水溶液原电池的两倍以上，并有极长的贮存寿命。

在过去 10 年间，原电池比能量提高的势头已减弱下来，这是因为现有电池已经趋于成熟，同时由于缺乏新的和从未试验过的电池材料与化学体系，从而使新型高能量电池的进一步发展受到了一定限制。但是电池的其他一些重要性能，如比功率、贮存寿命和安全性能仍在不断进步。用于小型消费电子装置的高功率碱性锌/二氧化锰电池的发展、普通锌/二氧化锰电池性能的改善以及新型锂电池的问世都可以作为近来这方面进展的实例。

世界范围内的原电池市场现在已达到每年 200 亿美元以上，并以每年高于 10%的增长率继续增长。这些原电池中的绝大多数都是人们熟知的圆柱形、扁平形或扣式电池，其容量在 20Ah 以下。少量大型原电池可达几千安时，它们在信号装置中用作电源或备用电源，而在其他军事和特殊用途中，用作为不受市电控制的独立电源。

在过去 20 余年间，我国原电池的产量一直处于快速增长中，年平均增长速度保持在 10%以上。其中在 1980～1990 年间为 10%，而 1990～2000 年间，上升为 30%左右。从 2000～2002 年年产量由 170 亿只增至 209.3 亿只，这期间使中国成为了世界最大原电池生产国。但是由于中国的锌/二氧化锰电池产品中一直以普通浆糊型电池为主，因此在市场上处于低档次水平。

然而在锌/二氧化锰电池原电池中，我国的碱性锌/二氧化锰电池的产量增长最快，年产量已从 1992 年的仅仅 4500 万只增加至 2005 年的 46 亿只，增长了 100 倍。同时，美国、英国和日本的碱性锌锰电池早在 1992 年已实现了无汞化，至 1996 年，发达国家生产的各类干电池都已无汞化，而且不允许进口含汞电池。我国 9 部委“关于限制电池产品汞含量的规定”早已实施，2001 年 1 月 1 日起，电池产品的含汞量不允许超过电池重量的 0.025%，2005 年 1 月 1 日起，碱性 Zn/MnO_2 电池的含汞量不允许超过电池重量的 0.000 1%（此量为无汞电池的指标）。目前我国几家大型碱性锌锰电池企业都已实现了电池无汞化。其中，我国福建南平南孚电池有限公司已是目前国内最大的无汞碱性锌锰电池生产和出口基地。

1 电化学体系和特性

相对蓄电池而言，原电池的共同特点是使用方便，具有较长的储存寿命。每种原电池都有他们各自的特点。主要商品原电池的电化学体系、化学原理及其基本特点说明在表 6.2-1 中。

表 6.2-1 主要商品原电池的种类、电化学反应及其典型特点

电池名称	反 应 式	标称电压(V)	基 本 特 点
锌/空气电池	$2Zn+O_2+H_2O \longrightarrow 2Zn(OH)_2$	1.65	比能量高、价格低
锌/二氧化锰电池	$Zn+2MnO_2 \longrightarrow Mn_2O_3+ZnO$	1.50	价格低、应用广泛
碱性锌/二氧化锰电池	$Zn+2MnO_2+H2O \longrightarrow 2MnOOH+Zn(OH)_2$	1.50	价格较低、容量大、贮存寿命长(5 年)、无汞电池为绿色电池
锌/氧化银电池	$Zn+Ag_2O+H_2O \longrightarrow 2Ag+Zn(OH)_2$	1.59	放电电压平稳、比能量高
锂/二氧化锰电池	$Li+MnO_2 \longrightarrow LiMnO_2$	3.00	比能量高、贮存寿命长(10 年)、安全
锂/亚硫酰氯电池	$4Li+2SOCl_2 \longrightarrow 4LiCl+SO_2+S$	3.60	比能量极高(300Wh/kg 以上)、电压高、贮存寿命长
锂/二氧化硫电池	$2Li+2SO_2 \longrightarrow Li_2S_2O_4$	2.91	比能量高、内阻低、大电流放电能力强、低温性能好(−50℃)
锂/氟化碳电池	$Li+CF \longrightarrow C+LiF$	2.82	比能量高、安全低温性能好

图 6.2-1 比较了主要原电池的放电曲线，由表 6.2-1 和图 6.2-1，可以看出锌系列电池的工作电压在 1.2～1.65V 区间，一般称为 1.5V 电池系列；而锂电池系列的工作电压在 3V 左右或 3V 以上，一般称为 3V 电池系列。由于电压不同，这两类电池系列同尺寸电池通常不能进行直接取代，否则可能造成用电装置损坏或不能正常工作。

由图 6.2-1 还看出，除 Zn/MnO_2、碱性 Zn/MnO_2 和 Li/MnO_2 电池的放电曲线比较倾斜外，其他原电池都显示平坦的放电特征，即 Zn/Ag_2O、Li/SO_2 和 $Li/SOCl_2$ 等原电池系列都具有很高的电压稳定性。对那些要求电压精度高的应用场合，后者成为优选对象。图 6.2-2 和图 6.2-3 分别对扣式电池和标准型 R6 电池（常见的 AA 型电池或我国俗称的 5 号电池）的典型放电曲线进行了比较。

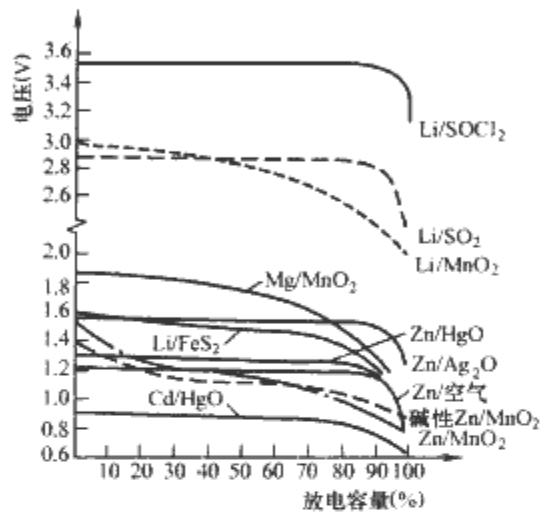


图 6.2-1　各电化学体系原电池以 30～100h 率放电时的放电曲线

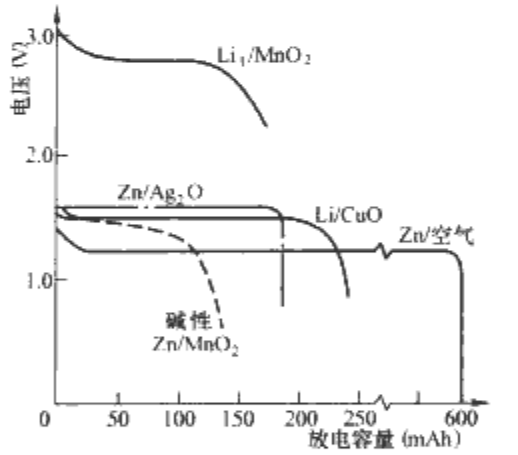


图 6.2-2　在 20℃下，尺寸为 11.6mm×5.4mm 的各种电化学体系扣式原电池典型放电曲线（Li/MnO_2 电池为 1/3N 型）

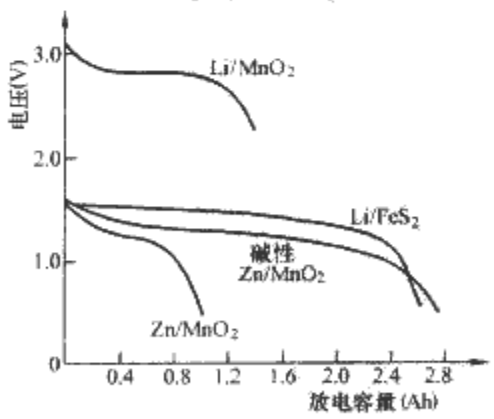


图 6.2-3　各电化学体系原电池典型放电曲线（R6 型电池，约 20mA 的放电率；Li/MnO_2 为 CR1733 型电池）

图 6.2-4 和图 6.2-5 分别对各种电化学体系原电池的比功率和比能量特性进行了比较。不同电化学体系的原电池的贮存寿命特性见图 6.2-6，由图看出，原电池的贮存性能一般都优于蓄电池，而其中又以锂原电池和碱性锌/二氧化锰电池的贮存性能最为优异。同时看出电池的贮存寿命是随着贮存温度的下降而增加，低温贮存可延长电池的贮存寿命。为了延长电池的贮存寿命，过去曾采用低温贮存。

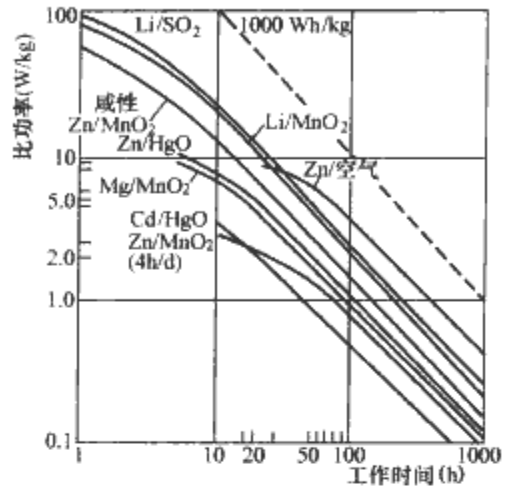


图 6.2-4　各种电化学体系原电池的比功率与工作时间的关系对比图

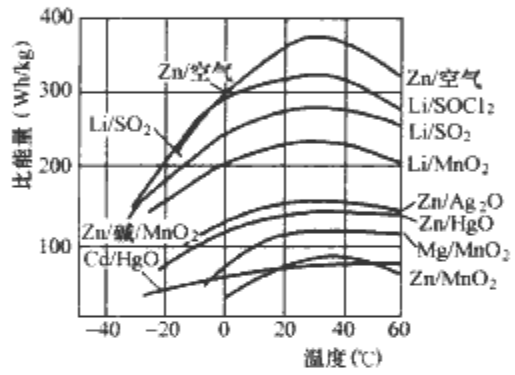


图 6.2-5　各种电化学体系原电池的质量比能量

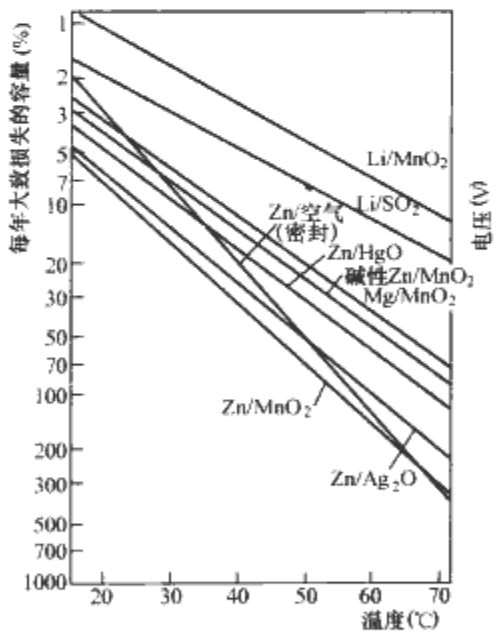


图 6.2-6　各种电化学体系原电池的贮存特性

2　性能价格比

为特定的应用选择最合适成本的电池时，除了电池初始成本外，还需考虑其他一些因素。这些因素包括电池在特定的使用条件下的特性，包括可能应用温度环境条件下的操作，贮存条件与要求以及其他影响电池容量的因数。放电率和工作制度对电池使用成本（单位工作小时的成本）的影响是非常显著的，作为一般用途的锌/二氧化锰电池只有在低电流间断工作的收音机及类似条件的应用中，其每小时的使用

成本是最低的；而目前碱性锌/二氧化锰电池在严格的连续电流应用中，例如应用于玩具和电子游戏装置中，虽然单体电池成本较高，但还是一种更为经济的电池。在诸如闪光灯和数码相机等的高电流应用中，锌/二氧化锰电池是不予推荐的。当对适合应用要求的候选电池进行性能评价时，可以采用类似的分析方法来确定哪种电池是性能价格比最高的。

3 国际标准体系

1992 年建立的 IEC 原电池组命名法是以电化学体系和电池组的形状和尺寸为基础的，我国基本以等同采用的方式，在相应的国家标准中予以确认。用于表示单体电池电化学体系和类型的字母与电池组命名法中的相同，而用代表直径/高度的数字代替上面所说的任意的尺寸等级。第一个数字表示以 mm 为单位的电池直径，第二个数字表示电池的高度（以 mm 的 10 倍为单位），如表 6.2-2（a）所示。表 6.2-2（b）和表 6.2-2（c）分别列出了代表电池形状和电化学体系的字母代码。作为对照，表 6.2-2（c）中也列出了 ANSI 用于代表电化学体系的字母代码。在 ANSI 命名体系中不使用字母代码表示电池形状。

现存的电池的命名法由来已久，表 6.2-3（a）列出了某些原电池和电池组的命名示例，表 6.2-3（b）列出了原电池组的 IEC 命名法。

表 6.2-2（a） IEC 原电池组命名体系示例

命名	单体电池数	体系代码（表 2.2c）	形状（表 2.2b）	直径（mm）	高（mm）	举 例
CR2025	1	C	R	20	2.5	由一只直径 20mm，高度 2.5mm，电化学体系代码为 C（由表 2.2c 可知为 Li/MnO_2）的单体电池组成的电池组

表 6.2-2（b） IEC 原电池组形状术语

字母代码	形 状
R	圆柱形
P	非圆形
F	扁形（片状）
S	方形（或矩形）

表 6.2-2（c） 原电池电化学体系的字母代码

IEC	负极	电解质	正极	标称电压（V）
—	锌	氯化铵，氯化锌水溶液	二氧化锰	1.5
A	锌	氯化铵，氯化锌水溶液	氧气（空气）	1.4
B	锂	有机溶剂/无机盐体系	氟化碳	3
C	锂	有机溶剂/无机盐体系	二氧化锰	3
E	锂	非水无机溶剂/无机盐体系	亚硫酰氯	3.6
F	锂	有机溶剂/无机盐体系	硫化铁	1.5
G	锂	有机溶剂/无机盐体系	氧化铜	1.5
L	锌	碱金属氢氧化物水溶液	二氧化锰	1.5
P	锌	碱金属氢氧化物水溶液	氧气（空气）	1.4
S	锌	碱金属氢氧化物水溶液	氧化银	1.55

表 6.2-3（a） 典型圆柱形、扁形、方形原电池或电池组的 IEC 命名①

IEC 命名	电池标称尺寸					ANSI 命名	常用命名
	直径	高	长	宽	厚		
圆柱电池组							
R03	10.5	44.5				24	AAA
R1	12.0	30.2				—	N
R6	14.5	50.5				15	AA
R6	26.2	50.0				14	C
R20	34.2	61.5				13	D
R25	32.0	91.0				—	F
扁形电池							
F22			24	13.5	6.0		
F80			43	43	6.4		
方形电池组							
S4		125.0	57.0	57.0			
S8		200.0	85.0	85.0			

① 表中列出的型号只是部分示例，其中的尺寸仅用于区别各个型号，详细尺寸信息可参见 IEC 60086—2 中相关规格表。

表 6.2-3（b） IEC 原电池组命名法的示例

IEC 命名	单体电池数	体系代码［表 6.2-2（c）］	形 状［表 6.2-2（b）］	单体电池［表 6.2-3（a）］	C，P，S，X，Y	并联组数	举 例
R20	1		R	20	①		由一只 R20 电池构成的圆柱形电池组，电化学体系字母（未标注）参见表 6.2-2（c）
LR20	1	L	R	20	①		同上，只是电化学体系字母 L 参见表 6.2-2（c）
6F22	6		F	22	①		由 6 只扁型 F22 电池串联组成的电池组，电化学体系字母（未标注）参见表 6.2-2（c）
4LR25—2	4	L	R	25	①	2	由 R25 电池 4 串 2 并组成的电池组，电化学体系字母（未标注）参见表 6.2-2（c）
CR17345	1	C	R				由一只直径未 17mm 高度未 34.5mm 的电池构成的圆柱形电池组，电化学体系字母 C 参见表 6.2-2（c）

① 命名中如果出现时，C、P、S 表示电池组不同的性能特征，X、Y 表示端子。

第3章　锌负极电池

1　锌/二氧化锰电池

锌/二氧化锰干电池已有一百多年的历史，其中氯化铵电池和氯化锌电池是现在普及的两种体系。当今第三世界国家对诸如手电筒照明、袖珍收音机和其他中低电流的用途，依然主要采用锌/二氧化锰干电池。该电池对许多应用来说，具有价格低、随时可用、且性能可以接受等特点。

历史上，现代干电池的原型是锌/二氧化锰湿电池，它是由电报工程师 Georges Lionel Leclanche 于 1866 年研制出来的。1876 年 Leclanche 将树脂（树胶）粘合剂添加到二氧化锰混合物中，然后在 100℃温度下通过采用液压方法将其压成块状物。Leclanche 的发明形成了当今锌/二氧化锰电池的主要组成部件，确立了从“湿式”电池转换至“干式”电池的概念。

1888 年 Carl Gassner 博士设计出第一个干电池，使用了不会破裂的由锌皮制成的杯状负极容器，通过采用含有熟石膏和氯化铵的糊状物使电解液得到固定；后来进一步用面粉替代熟石膏作为电解液的胶凝剂，从而导致了“干电池”小型电源的形成，并促进了锌/二氧化锰干电池的商品化和工业化生产。

干电池技术发展进程中，新材料研究与应用一直是电池技术发展的先导，其中采用电解和化学二氧化锰替代（或部分替代）天然二氧化锰，大大提高了材料的活性和电池的性能；采用乙炔黑替代石墨，不仅使正极结构导电性提高，而且由于它的强吸液性质使正极粉末的可加工性增强，从而实现了制造技术的不断改进，并使电池产品的生产成本得以降低；通过氯化锌电解质体系的研究与应用，替代或部分替代氯化铵型电解质，使电池的高电流放电能力得以显著提高；通过纸隔膜替代浆糊隔膜，使活性物质空间增大和电池容量得到提高；此外通过阐明反应机理和提出可排气的密封设计等，都对当代锌/二氧化锰干电池技术进步做出了贡献。

从 20 世纪 80 年代到现在，则集中到解决全球关注的环境污染问题，由此提出了消除电池内汞、镉和其他重金属的迫切要求，并已得到了较好解决。通过过去一个世纪的努力，与 1910 年的电池相比，当今的锌/二氧化锰干电池放电时间和贮存寿命几乎提高了 4 倍。

1.1　化学原理

锌/二氧化锰干电池以锌为负极，二氧化锰为正极，氯化铵和/或氯化锌的水溶液为电解液。碳（乙炔黑）与二氧化锰相混合以改善导电和保持水的能力。电池放电时，在锌被氧化的同时，二氧化锰被还原。简化的电池总反应是

$$Zn+2MnO_2 \longrightarrow ZnO \cdot Mn_2O_3$$

实际上，锌/二氧化锰干电池的化学反应十分复杂，至今有关电极反应的细节仍存在争议。此外由于 MnO_2 是一种非化学计量氧化物，所以它的化学组成和化学性质十分复杂，可以更加精确地表示为 $MnO_{1.9}$。其化学反应的效率取决于诸如电解液的浓度、电池的几何形状、放电率、放电温度、放电深度、扩散速率以及采用 MnO_2 的类型等。相应采用不同电解质的电池反应可以分别描述如下：

（1）采用氯化铵电解质的电池

低电流放电

$$Zn+2MnO_2+2NH_4Cl \longrightarrow 2MnOOH+Zn(NH_3)_2Cl_2$$

高电流放电

$$Zn+2MnO_2+NH_4Cl+H_2O \longrightarrow 2MnOOH+NH_3+Zn(OH)Cl$$

长时间间歇放电

$$Zn+6MnOOH \longrightarrow 2Mn_3O_4+ZnO+3H_2O$$

（2）采用氯化锌电解质的电池

低电流与高电流放电

$$Zn+2MnO_2+2H_2O+ZnCl_2 \longrightarrow 2MnOOH+2Zn(OH)Cl$$

或者是

$$4Zn+8MnO_2+9H_2O+ZnCl_2 \longrightarrow 8MnOOH+ZnCl_2 \cdot 4ZnO \cdot 5H_2O$$

长时间间歇放电

$$Zn+6MnOOH+2Zn(OH)Cl \longrightarrow 2Mn_3O_4+ZnCl_2 \cdot 2ZnO \cdot 4H_2O$$

2MnOOH 有时被写成 $Mn_2O_3 \cdot H_2O$，而 Mn_3O_4 被写成 $MnO \cdot Mn_2O_3$。同时，在延长放电时间的条件下，MnOOH 相对于 Zn 的电化学放电不能提供有用的工作电压。

基于 Zn、MnO_2 和简化的电池反应计算，理论电池比容量可达 224Ah/kg。但在实际情况下，电解质，碳黑和水份都是电池不可省略的组成部份。如果这些材料均以常用量添加到上述“理论化”的电池中，则计算表明，此时电池的比容量只大约为 96Ah/kg。事实上这是通用型电池所具有的最高比容量，但确是某些大型电池在特定放电条件下，可以接近放出的比容量。实际使用时，考虑到电池组成和放电效率等所有因素，在间歇放电条件下，当电流非常小时，比容量可达 75Ah/kg，而在高电流下仅为 35Ah/kg。

1.2　电池的电化学体系类型

目前，锌/二氧化锰干电池大体上仍可分成以下两种电化学体系，即氯化铵型和氯化锌型。针对不同应用要求设计与制造出的电池又可区分成普通型和高档型电池等级，其内部皆可采用浆糊式和纸板隔膜结构：

（1）氯化铵型锌/二氧化锰电池。普通型（或一般应用型）：适合低放电率间歇放电和低价格应用场合。它采用锌为负极，氯化铵（NH_4Cl）和氯化锌混合物为电解液，浆糊为隔膜，天然二氧化锰矿（MnO_2）为正极。该型电池通常又称谓“浆糊干电池”，其成本最为低廉，因此被推荐作为一般目的使用。我国现今这种电池的生产量依然很大，并大批量出口到第三世界国家。

重负载型：适合中等至高放电率间歇放电和中低价格应用场合。重负载锌/二氧化锰干电池已转换到氯化锌体系（但也有部分仍然使用氯化铵和氯化锌混合电解质），电解或化学合成二氧化锰（EMD 或 CMD）单独或与天然二氧化锰矿混合用作正极。隔膜可以是淀粉浆糊，但典型的是浆糊涂敷的纸板层。后一种采用纸板隔膜的电池通常又称谓“纸板电池”。

(2) 氯化锌型电池。普通型（或一般应用型）：适合低放电率间歇和连续放电以及低价格应用场合。这种电池在发达国家已经完全替代了氯化铵型中的普通应用型电池，它是一种纯“氯化锌型”电池，并具有高档次电池的某些重负载特性。这类电池的电解质是氯化锌，但有些制造商也有加入少量氯化铵，而正极采用了天然二氧化锰矿。

重负载型：适合中等至高放电率间歇放电和中低价格应用场合。该电池一般用于取代氯化铵型中的重负载型电池，它是一种纯“氯化锌”电池，并具有高档次氯化锌电池的重负载特性。这类电池的电解质是氯化锌，但有些制造商也有加入少量氯化铵；正极采用了天然二氧化锰矿与电解二氧化锰混合物，隔膜是采用纸板层，其上涂敷了交联或改性的淀粉糊，使电解质的稳定性得到提高。这种电池也显示出低的漏液特点。

超重负载型：适合中等至重负载连续放电与重负载间歇放电，并且可接受比其他氯化锌电池价格高的应用场合。超重负载型电池是氯化锌电池系列的高档次产品，它的电解质主要是氯化锌，或许也含有少量氯化铵，但其量一般不超过正极质量的 1%；正极活性物质单独使用电解二氧化锰(EMD)；隔膜是采用纸板层，其上涂敷了交联或改性的淀粉糊，使电解质的稳定性得到提高。现在许多制造商在几乎所有类型的锌/二氧化锰电池中都采用了专有隔膜。这种电池的低温性能和防漏性能也有明显提高。

一般说来，锌/二氧化锰干电池的品位或等级越高，它的单位工作时间（min）费用越低。电池等级间的价格差别大约是 10%～25%，但电池的性能差别却往往可高达 30%～100%，准确的提高数值则依赖于等级选择和使用的负载情况。

1.3 电池结构

锌/二氧化锰干电池具有多种尺寸和多种设计，但基本结构只有圆柱形和平板式两种。在两种结构中使用的是相似的化学体系和成分。

1.3.1 圆柱形电池结构

普通氯化铵型圆柱形电池如图 6.3-1 所示，锌筒起着容器和负极的双重作用，混有乙快黑的二氧化锰用电解液润湿，然后经压制成碳包。插在碳包中间的碳棒起着正极集流体的作用，它保证了碳包结构的强度。同时这种多孔体，既可允许电池中积聚起的气体逸出，又可防止电解液泄漏出来，隔膜将两个电极机械隔离开来，而且又提供了离子（通过电解液介质）迁移的途径。隔膜可以是电解液浸湿的谷物浆糊（图 6.3-1），或者也可以是一种采用淀粉糊或聚合物涂敷的吸液牛皮纸（纸板电池）。后者的使用让隔膜所占空间减薄，从而不仅使电池内阻降低，还使电池活性物质体积增加。单体电池用金属、厚纸板、塑料或纸套管包封起来，既为了美观，同时可以降低电解液通过壳体泄漏。

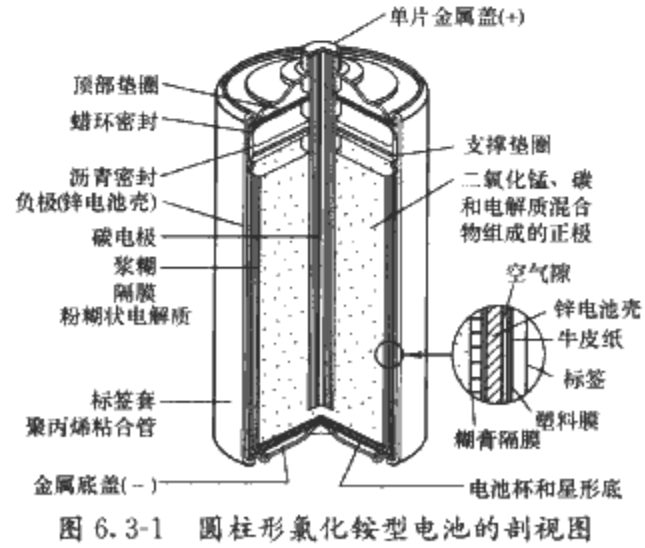


图 6.3-1 圆柱形氯化铵型电池的剖视图
(糊膏隔膜和沥青密封)

氯化锌圆柱形电池（图 6.3-2）与氯化铵型圆柱形电池不同，它通常有一个自动恢复功能的排气密封装置，作为集流体的碳棒是用蜡密封涂敷，以堵塞住所有排气通道（这些通道对氯化铵型锌/二氧化锰类型电池是必需的）。由此排气只能限制于这个密封处的排气孔，既可以防止电池内部干涸，又可以限制贮存期间氧气进入电池，此外由锌腐蚀产生的氢气也可以从电池内安全排出。总的来说，该电池的装配与最后成型过程类似于早先的圆柱形电池。

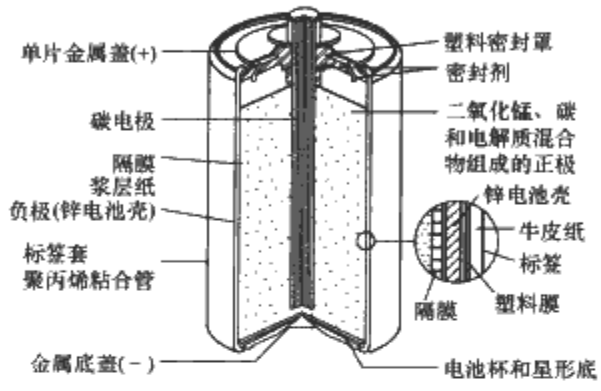


图 6.3-2 圆柱形氯化锌电池的剖视图
(糊膏隔膜和塑料密封)

1.3.2 叠层电池和电池组

叠层电池如图 6.3-3 所示。在这种结构中，利用在锌片上涂敷填充碳的导电涂料或者是将锌片与填充碳涂料的薄膜压制在一起，形成一个双电极。这种涂敷可以提供锌负极的电接触，又使它与邻近的下一个电池的正极隔开，同时它起到正极集流体的作用，而且这种集流功能与圆柱电池中的碳棒是相同的。当采用这种涂料方法时，在装配之前锌的涂敷面上必须有一层粘结剂，以便使涂敷表面与包裹单体电池的聚乙烯套形成有效的直接密封。该电池结构不像圆柱形电池那样有空气室和碳棒。采用导电性聚异丁烯膜替代导电性涂料和粘结剂，将它与锌片压制在一起常常可以改善与聚乙烯的密封性。然而这种膜往往比涂料和粘结剂设计要占据过多空间。这些结构方法可以简便地用于装配多电池电池组。

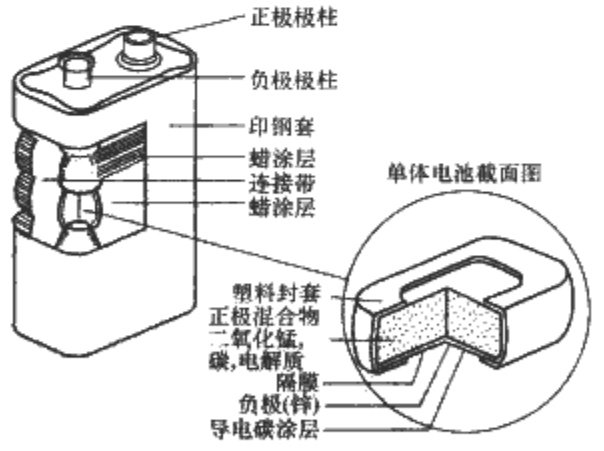


图 6.3-3 氯化锌型平板式单体
电池和电池的剖视图

由于包装和电接触达到了最小化，叠层电池设计增大了正极混合物的有效空间，提高了比能量。另外矩形结构在组合时减少了浪费的空间(事实上只应用于叠层电池)。由迭层电池组合的电池组，其体积比能量大约是圆柱形电池组的两倍。

利用金属条将组合电池的末端与电池组的接线端子连接起来（如 9V 收音机电池组）。电池堆装配的方向性只是

对每个制造商的装配方法有重要性，而采用金属条则适用于各种装配模式。装配好的完整电池组通常用蜡或塑料包裹，一些制造商也在电池组浸蜡后，再套一个热缩性的塑料套。这可以使电池组具有良好的清洁度、并提供附加的防漏保证。成本、易于装配和高效率通常作为装配过程的指导原则。

1.4　工作特性

氯化铵型和氯化锌型电池在特定应用中都可显示良好的性能，但在其他应用中有可能显示较差的性能。影响电池放电性能有许多因素，因此有必要评估应用的特点（放电条件、成本、质量等）以便做出对电池的恰当选择。许多制造商为此目的提供了大量数据。

1.5V 的电池用于手电筒照明时的典型终止电压可定为 0.9V，某些收音机装置允许电池电压降到 0.75V 或更低些。而另一些电子装置只允许电压降到 1.2V。很显然当使用电池的装置仍能工作的情况下允许电压下降的越低，电池所释放出的总能量就越多。但较低的电压会影响某些应用，如手电筒变暗收音机音量变小。

锌/二氧化锰干电池的性能对放电制度极为敏感，间歇放电条件下电池的性能通常明显优于连续放电（如图 6.3-4 和图 6.3-5 所示），这是因为停止放电期间，电池有一个性能恢复的机会，迁移现象可使电池中的反应物再分配，从而减小电池内的极化。相比之下，氯化锌型电池不仅可以更大电流放电，并且在间歇放电时可提供更多的放电循环。

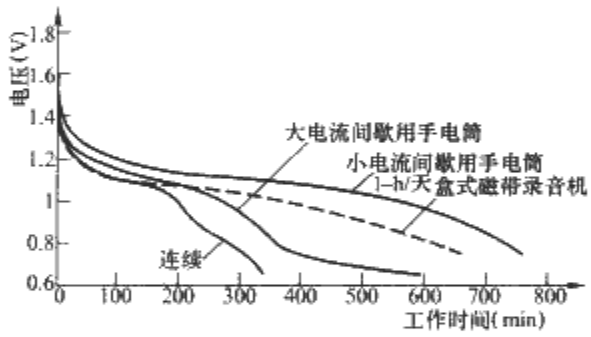


图 6.3-4　在不同的放电条件下，R20 型锌/二氧化锰电池在 20℃以 3.9Ω 负载放电时的性能曲线

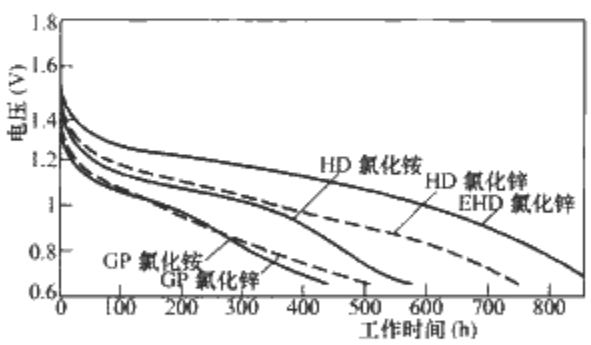


图 6.3-5　以 4min/h，8h/天放电制，R20 型氯化铵型电池和氯化锌型锌/二氧化锰电池在 20℃、2.2Ω 负载放电时的放电曲线（GP：普通型；HD：高负载型；EHD：超高负载型）

锌/二氧化锰干电池在贮存期间容量会逐渐下降，这是由于锌腐蚀、化学副反应和水分损失所引起的，部份放电的电池比完全未放电电池的衰减得更严重。容量下降的速率与贮存温度有关，高温会加速容量损失，低温可延长电池的贮存寿命。图 6.3-6 表示出在 40℃、20℃和 0℃下贮存后的容量保持率。一般氯化锌型电池容量保持能力比氯化铵电池强，这是由于隔膜（采用纸板隔膜）、密封和其他材料的改进所致。

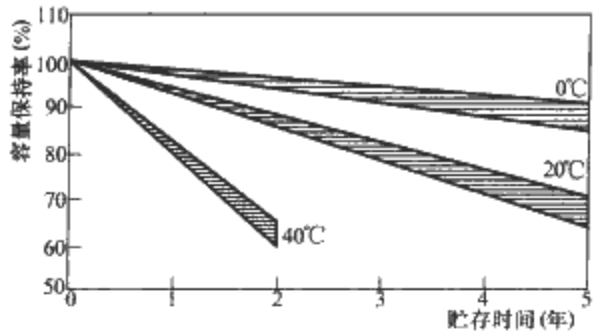


图 6.3-6　纸板隔膜氯化锌型锌/二氧化锰电池分别在 40、20℃和 0℃贮存后的容量保持率

1.5　电池的型号、尺寸及其特性

表 6.3-1 列出了主要商品锌/二氧化锰电池的型号和尺寸。

表 6.3-1　主要商品锌/二氧化锰电池的型号和尺寸

型　号	标称电压（V）	尺寸（最大值，mm）	
		直　径	高　度
R20	1.5	34.2	61.5
R14	1.5	26.2	50.5
R6	1.5	14.5	50.5
R03	1.5	10.5	44.5
R1	1.5	12.0	30.2
6F22	9.0	26.5×17.4×48.5	

注　圆柱形电池又有不同等级产品，如 P（功率型）、S（容量型）之分。

2　碱性锌/二氧化锰电池

自从 1960 年问世以来，由于碱性电池体系比原先主导市场的酸性电解质体系的普通锌二氧化锰电池有明显的优越性，碱性二氧化锰电池（$Zn/KOH/MnO_2$）已经成为袖珍电池市场占主导地位的电池体系。在表 6.3-2 中汇总了碱性二氧化锰电池的优点和缺点，并与普通锌二氧化锰电池作了比较。

鉴于碱性电池性能优异，而发展历史较短，因此其一直受到关注和继续处于技术不断发展态势。现有圆柱电池技术的更新则尤为显著，这包括薄壁厚底圆柱壳体的采用，使电池内部空间得以扩大，进一步提高了电池设计容量；采用有机抑制剂，它能够减少锌负极中杂质的产气速率，使电池产品的鼓胀与漏液率降到最低；引入极薄的塑料标签和厚度减薄的密封圈，进一步扩大了内部空间，从而又可以增加活性物质和提高电池容量等，与初始电池相比，该电池的比能量提高了 60%以上。而且特别要提到的是在环境保护推动下，通过电池材料杂质等级的不断减低和其他有效措施（如添加剂选择等），使电池的汞含量降至最低，达到了绿色环保型碱性锌/二氧化锰电池的“无汞”标准要求。

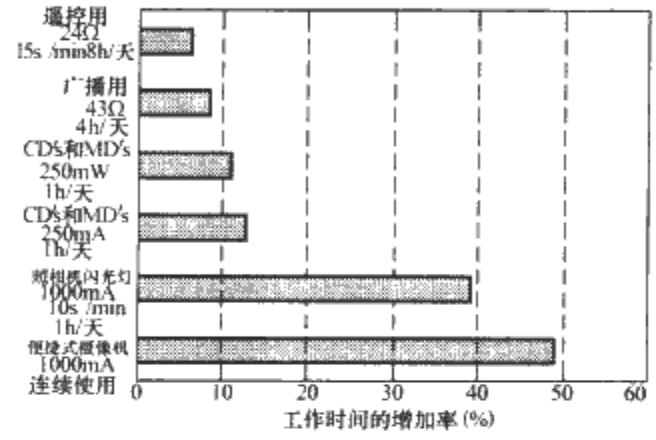
表 6.3-2　圆柱型碱性锌/二氧化锰电池的主要优、缺点（与普通锌/二氧化锰电池相比较）

优　点	缺　点
1. 较高的体积比能量 2. 放电性能更高 连续或间歇放电 低倍率和高倍率 室温和低温	较高的初始成本

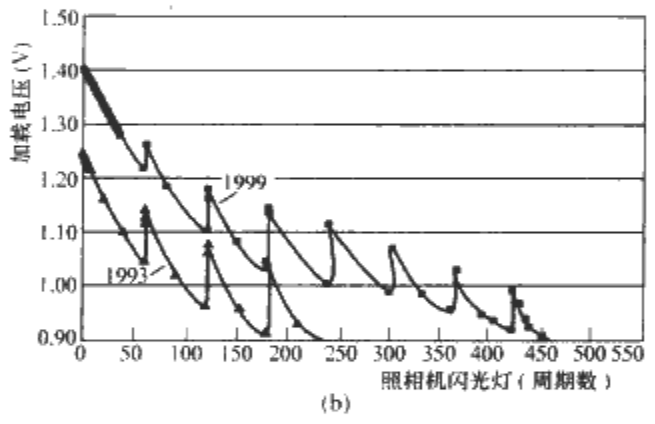
续表

优 点	缺 点
3. 低内阻 4. 长贮备寿命 5. 抗泄漏 6. 形状稳定	较高的初始成本

更近一段时期来，则将主要努力集中到提高电池的高放电率能力上，以满足新型小型电子装置，如数码相机、摄像机、手机和 PDA 等的脉冲功率需求。在这些高放电率应用中，该电池的性能远远优于原碱性锌/二氧化锰电池市售产品的优质电池已经投放市场。图 6.3-7（a）表示出特定电池性能提高的程度，图 6.3-7（b）则显示出特定电池模拟闪光灯电源使用时的特性。



(a)



(b)

图 6.3-7 碱性锌/二氧化锰电池性能改进的表征
（a）在模拟不同用电器的使用条件下，LR6 型（AA 型或 5 号电池）高级碱性锌/二氧化锰电池比标准 LR6 型电池的性能改进程度；（b）模拟放电对比 1993 年和 1999 年生产的照相机闪光灯用高倍率放电 LR6 型（AA 型或 5 号电池）碱性二氧化锰电池的性能比较

同时，采用与圆柱碱性锌二氧化锰电池相同化学成分的超小型扣式电与其他同类锌氧化汞、锌氧化银和锌空气扣式电池相比，也显示出明显的竞争优势。

2.1 化学原理

在碱性二氧化锰电池中的活性物质是电解制备的二氧化锰（EMD）、碱性水溶液电解质和粉末状金属锌。由于电解二氧化锰具有较高含量、高的反应性和高的纯度，因此用它替代了原先使用的化学二氧化锰或天然锰矿。电解质是高浓度的碱溶液，一般 KOH 含量在 35%～52%之间，使溶液具有很高的电导率，而且比在普通锌二氧化锰电池酸性电解质中的析气速度明显降低。采用粉末状态的锌使负极具有大的表面积，适应了高放电率的要求（减低了真实电流密度），同时使负极上的固相与液相分布更加均匀（降低了反应物质和产物的质量迁移极化）。

放电时正极上二氧化锰首先经历一个单电子还原，生成 MnOOH

$$MnO_2 + H_2O + e \longrightarrow MnOOH + OH^- \quad (6.3\text{-}1)$$

在较低电压下，MnOOH 可进一步按下式进行放电

$$3MnOOH + e \longrightarrow Mn_2O_3 + OH^- + H_2O \quad (6.3\text{-}2)$$

该反应形成一条平坦的放电曲线，但它也慢于第一个还原步骤，因而只在低放电率条件下才是有用的。

在放电反应的最初阶段，负极在浓碱溶液中的放电反应会产生可溶性锌酸根离子

$$Zn + 4OH^- \longrightarrow Zn(OH)_4^{2-} + 2e \quad (6.3\text{-}3)$$

当放电反应进行到某一时刻，电解质中的锌酸根离子就会达到饱和，此时反应产物就转化成 $Zn(OH)_2$。而上述转折点的确立则取决于负极的初始组成、放电的速率与深度。若负极是处于水干涸的环境，氢氧化锌就脱水生成 ZnO，其反应按下述步骤进行

$$Zn + 2OH^- \longrightarrow Zn(OH)_2 + 2e \quad (6.3\text{-}4)$$

$$Zn(OH)_2 \longrightarrow ZnO + H_2O \quad (6.3\text{-}5)$$

在某些条件下，附着在电极表面的放电产物十分致密，以至于引起锌的钝化。这些条件包括高电流放电、低温以及由于诸如低的 KOH 浓度和高锌酸盐浓度等限制 ZnO 溶解的各种因素。具有高表面积的锌负极就不易发生钝化。

由此，每个克分子 MnO_2 一个电子的电池总反应式为

$$2MnO_2 + Zn + 2H_2O \longrightarrow 2MnOOH + Zn(OH)_2 \quad (6.3\text{-}6)$$

由于水在该表达式中是反应物质，因此出现水干涸环境会严重影响到电池的高放电率性能，为了避免这种限制，必须细致处理水的交换问题，使其能在短时间内从电池的一个区域转移到另一个区域。

相反，以低等或中等电流放电时，电池的总反应式可以写为

$$3MnO_2 + 2Zn \longrightarrow Mn_3O_4 + 2ZnO \quad (6.3\text{-}7)$$

在这些条件下，则不存在对水实施管理的问题。

碱性锌二氧化锰电池的初始开路电压大约为 1.5～1.65V，其具体数值取决于正极材料的纯度与活度以及负极中 ZnO 的含量。取终止电压 0.75V 时，电池放电的平均电压大约为 1.2V。

除在碱性电池中的固有反应外，负极锌还可能在电解质溶液中产生析气反应。纯锌的析气速度是非常低的，但是微量重金属杂质的存在就会在负极区域形成微电池效应，极大地加快氢气逸出的速度。可以采取几种可能措施来降低这种析气反应，包括：①在负极中添加 ZnO，降低锌自融解反应的推动力；②在负极中加入无机或有机物缓蚀剂；③降低电池各组分的杂质含量水平；④采用几种金属元素抑制剂，如铅或铟使锌合金化；⑤将锌与汞形成汞齐化（该项措施当前已基本不用了）。

2.2 电池结构

2.2.1 圆柱结构

图 6.3-8 表示出一种商品碱性二氧化锰圆柱电池的典型结构。圆柱形钢制壳体既用作电池的容器，也作为正极的集流体。正极是由二氧化锰、石墨和碳黑混合导电剂以及其他添加剂压制而成，它在壳体中形成了与壳体内表面紧密接触的中空圆柱体。在正极中空体内放置多层隔膜，而在隔膜中间便是负极，其中有金属棒状集流体与其接触，该集流体穿过塑料密封件与电池负极端子相连。电池顶部和底部分别有

金属帽，本体还有一个金属或塑料的外壳。顶帽和底帽具有双重功能，除了有装潢与防腐作用外，也提供作为电池的极柱使用。由于碱性二氧化锰圆柱电池是直接用于替代普通锌二氧化锰电池，因此上述设计是必要的。普通锌二氧化锰电池的负极端（锌筒）是平坦的，而正极端子是一个突出的小帽，它套在作为集流体的碳棒的顶部。圆柱碱性二氧化锰电池与普通锌二氧化锰电池不同，它采用了反极式结构，内部的电池容器是作为正极集流体，而负极集流体需从密封件中央引出。因此，要使其外部形式与普通锌二氧化锰电池相似，圆柱碱性电池也必须采用平坦的金属底盖与负极集流端子相接触，而采用一个如同普通锌二氧化锰电池正极突起的底部小帽与壳体底部接触（某些制造商在壳体上冲压一个突起，从而无需底部小帽）。

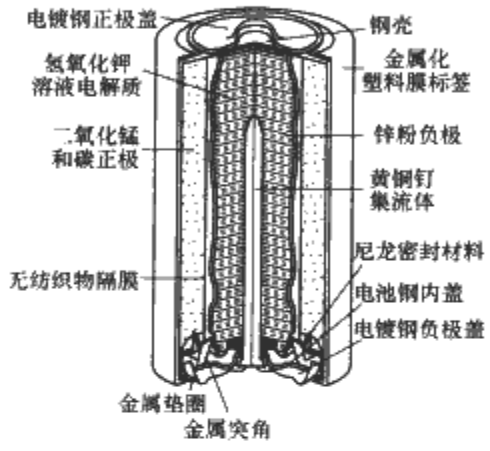


图 6.3-8　一种圆柱形碱性二氧化锰电池的截面图

2.2.2　扣式电池结构

图 6.3-9 表示出扣式碱性二氧化锰电池的结构，它基本上与其他类型扣式碱性电池相同。通常正极片在壳体中，负极混合物在上盖中，两者之间有一层或多层圆片状隔膜以及处于盖与壳之间塑料密封圈，电池壳体上部经卷边后便形成压缩密封，可以防止电池泄漏。

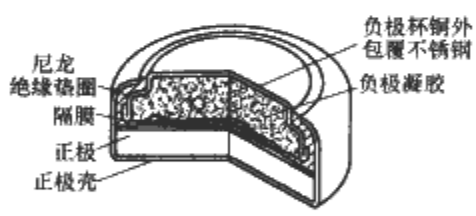


图 6.3-9　扣式碱性二氧化锰电池截面图

2.3　工作特性

由于碱性锌/二氧化锰电池采用的二氧化锰材料纯度和反应活性更高、正极密度高，且含电解液少以及电池的其他组分所占的空间最小（隔膜和集流体等），从而使碱性二氧化锰电池比同尺寸的普通锌/二氧化锰电池可以具有高得多的设计容量。同时由于 KOH 电解质具有非常高的电导率，而粉末状锌负极具有大的真实表面积（与普通锌二氧化锰电池中的低面积锌负极相比），以致使电池内阻和极化不仅在放电初始非常低，并且一直到放电至寿命终止时，都依然保持比较低的水平，从而保证了该电池不仅比普通锌/二氧化锰电池放出更高的实际容量、显示更高的设计容量百分数（即高的利用率），而且可以具有更高的放电率能力，如图 6.3-10（a）和 6.3-10（b）所示，试验条件为恒电流连续放电。

圆柱与扣式碱性二氧化锰电池放电曲线的特征是相似的，电压起始在 1.5V 以上，并逐步随放电而下降。这种特征乃是由二氧化锰均相反应性质所决定的。图 6.3-10 显示出了碱性二氧化锰电池的倾斜的放电特征，但它比普通锌/二氧化锰电池的放电曲线平坦得多。对大多数使用这种圆柱电池的用电装置（收音机、闪光灯、玩具等）而言，它们在低至中等电流下工作时，一般可以承受这种较大的电压变化。由于电压是逐步的降低，由此当电池接近其寿命终点时能给用户一个预先的警示，因而这种倾斜的放电特征反而可能变成一个优点。

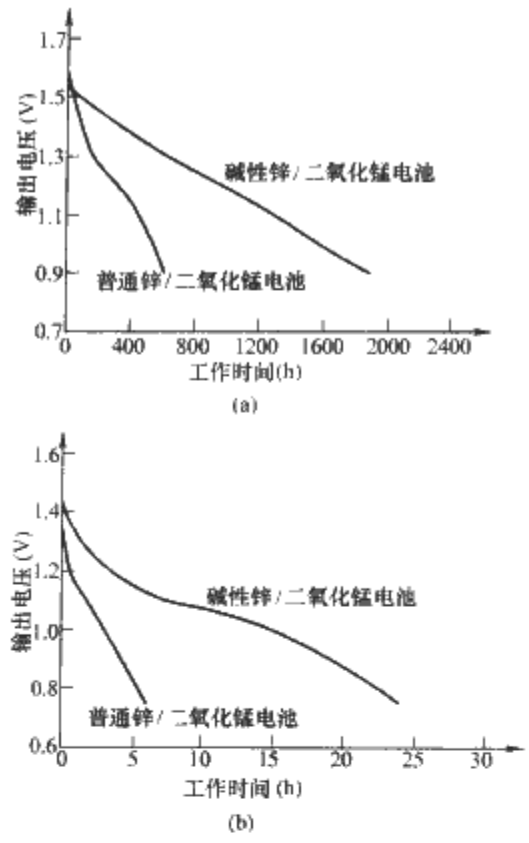


图 6.3-10　R20 型碱性锌/二氧化锰电池和普通锌/二氧化锰电池性能对比
（a）小电流放电特性（20℃下以 30mA 放电）；
（b）大电流放电特性（20℃下以 500mA 放电）

与上述应用不同，使用扣式碱性电池的其他类型装置通常对斜的放电特征不太适应，因此大多数这类装置需要采用诸如锌/氧化银一类电化学体系的电池。在允许使用扣式碱性二氧化锰电池的应用情况下，则是十分经济的选择。

碱性锌/二氧化锰电池的输出容量取决于放电时的放电制度，如图 6.3-11 所示，以低放电率连续放电和重度间歇放电时，电池输出的容量几乎相同。但以高放电率连续放电时，电池输出的容量比间歇放电时的要低。这是因为暂停放电期间，电池的容量能得到恢复。与普通锌/二氧化锰电池相反，碱性锌/二氧化锰电池在连续放电和间歇放电时的输出容量差要小得多。

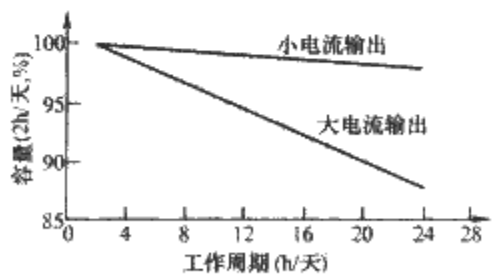


图 6.3-11　在小电流和大电流输出下，碱性二氧化锰电池的输出容量对比
（2h/天间歇放电的容量为 100%作基准）

碱性锌/二氧化锰电池既可以在高达 55℃下工作，也可以在低到－30℃温度下工作，如其他电池一样其放电性能随温度降低而降低，而且低温下的放电限制也是由电解质的冰

点温度所确定的。相比之下，碱性锌/二氧化锰电池的工作温度范围要比锌/二氧化锰干电池宽得多，而且其输出容量变化也小得多。

此外，碱性锌/二氧化锰电池比普通锌/二氧化锰电池显示了更好的贮存性能，如图 6.3-12 所示。可以看出，常温下电池贮存两年后，其容量损失只有约 5%，4 年后升至约 10%。同普通锌/二氧化锰电池一样，贮存在较低的温度下，可以延长电池的贮存寿命（保持要求容量值的贮存时间）。

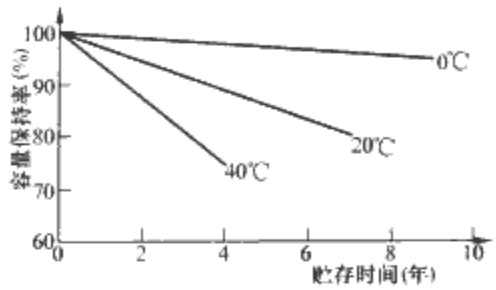


图 6.3-12 贮存时间和温度对碱性二氧化锰电池性能的影响

表 6.3-3 列出 LR6 型碱性锌/二氧化锰电池在模拟在常用装置中的工作条件下的工作时间。与采用一般 R6 电池相比，其工作时间大大延长了。虽然普通 R6 电池价格低很多，但是在诸如作为磁带录音机、照相机、便携灯 CD/TV 和脉冲等应用场合，采用 LR6 型碱性锌/二氧化锰电池的性能价格比将是优越的。

表 6.3-3 21℃下 LR6 型碱性锌/二氧化锰电池模拟应用试验的预测平均工作时间

制 度	1.2V 时典型电流值 (mA)	负载 (Ω)	终止电压 (V) 0.75	0.8	0.9	1.0
			h			
收音机，8h/天	16	75	169	167	155	125
计算器，1h/天	80	15	33	29	26	21
磁带录音机，1h/天	120	10	21	19	17	14
			min			
照相机，4min/15min，8h/天，16h 贮备	250mA 恒流			368		
			min			
便携灯，4min/h，8h/天，16h 贮备	308	3.9	404	372	338	292
玩具，连续	308	3.9	425	399	339	273
CD/TV，1h/天	308	3.9	446	404	348	282
			脉冲次数			
脉冲，15s/min，24h/天	667	1.8		584		

2.4 电池的型号、尺寸及其特性

各种尺寸的圆柱形和扣式碱性二氧化锰原电池和电池组列于表 6.3-4 中，表中某些电池尺寸并不是单体电池的尺寸，而是多个单体电池构成的组合电池。圆柱电池除采用美国国家标准、IEC 和 ANSI 命名方式外，电池制造商一般也有自己的电池标识代码。对扣式电池制造商则倾向使用自己的代码。电池组既可以由多个圆柱单体电池构成，也可由多个扣式单体电池制成（表 6.3-5）。

表 6.3-4 1.5V 标准碱性锌/二氧化锰电池特性①

型号尺寸	IEC	ANSI	容量② (Ah)	标称尺寸 直径 (mm)	高度 (mm)	重量 (g)	体积 (cm^3)
圆柱形							
AAAA	LR61③	25A	0.56	8	42	65	2.2
N	LR1	910A	0.8	12	29	9	3.3
	LR50		0.56	16	16	11	3.6
AAA	LR03	24A	1.1～1.25	10	44	11	3.8
AA	LR6	15A	2.5～2.85	14	50	23	7.5
C	LR6	14A	7.1～8.4	26	50	66	26
D	LR20	13A	14.3～18	34	61	138	54.4
F	LR25		22	33	90	20	80
扣 式							
	LR41		0.035	7.9	3.6	0.6	0.2
	LR43	1167A	0.100	11.6	4.2	1.4	0.3
	LR44	1166A	0.145	11.6	5.4	2.3	0.5
	LR48		0.060	7.9	5.4	0.9	0.3
	LR53	1129AP	0.160	23.0	5.9	6.8	2.3
	LR54	1168A	0.072	11.6	3.1	1.1	0.3
	LR55	1169A	0.040	11.6	2.1	0.9	0.2

① 基于不同制造商提供的典型数据。

② 容量数据基于以额定电流放电时的典型值，有些制造商标注更高的容量。

③ 按 IEC 提议的命名规则：LR8D425。

2.5 高级碱性锌/二氧化锰高放电率电池

1999 年以来，特殊设计的碱性锌二氧化锰电池能在更高放电率下工作，并能比标准电池显示更好的性能。他们能满足市场上小型用电装置的更苛刻的高功率需求（如数码相机、手机、PDA 等）。高级 AA 型电池的放电性能分别表示在图 6.3-13（a）、（b）中。

表 6.3-5 标准组合碱性锌/二氧化锰电池特性

电压 (V)	IEC	ANSI	标称尺寸 尺寸 (mm)	重量 (g)	体积 (cm^3)	容量 (Ah)
3	2LR53	1202AP	直径 24，高 12	14	5.4	0.16
3	2LR50	1308AP	直径 17，高 42.5	22	7.4	0.56
4.5		1313AP	41，17，11.5	12.2	7.4	0.17
4.5	3LR50	1306AP	直径 17，高 50	31	11	0.55
4.5	3LR50	1307AP①	直径 17，高 58	32.5	11.5	0.55
6	4LR44	1414A	直径 13，高 25	11	3.3	0.15
6	4LR61	1412AP	48，35.6，9	32	15	0.57
6	4LR25Y	915A②	110，67，67	885	434	22
6	4LR25X	908A③	105，67，67	885	434	22
				612	434	13
6		918A④	137，125，73	1900	1123	44
				1270	1123	27
6	4LR20—2	930A	140，118，67	1120	883	22
9	6LR61	1604A	49，26，17.5	46	21	0.58
12			10.3d，28.5h	7.4	2.37	0.034

① 与上面电池相似但具有锁扣式接头。

② 螺旋接头。

③ 弹簧接头，商品电池采用 D 型或 F 型单体。采用更大单体的电池容量和重量更大。

④ 商品电池采用 D 型或 F 型单体。采用更大单体的电池容量和重量更大。

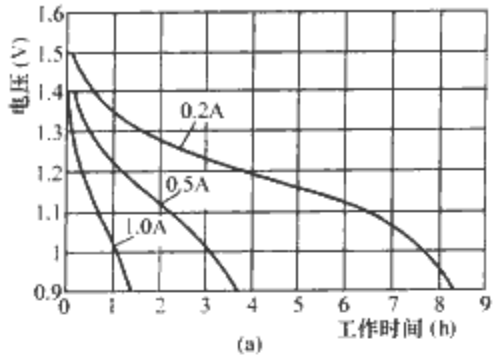


图 6.3-13　在 20℃下 LR6 型高级碱性锌二氧化锰电池的典型放电性能
（a）在不同电流下的放电性能；
（b）在不同功率输出下的放电性能

3　锌/氧化银（扣式）原电池

锌/氧化银原电池体系（锌/碱性电解质/氧化银）的体积比能量是所有电池系列中最高的，由此制备成小而薄的“扣式”电池是十分理想的。一价氧化银电池放电时的电压十分平坦，而且无论在高或低放电率下电压都非常稳定。该电池具有良好的贮存性能，室温下贮存 1 年后可保持初始容量的 95%以上。它也具有良好的低温放电能力，0℃下可以放出电池标称容量的大约 70%，－20℃下还可达到标称容量的 35%。由于具有这些优点，锌氧化银电池在小型电子和电器产品上得到了广泛应用，例如：手表、计算器、助听器、血糖仪、照相机和其他用途等。这些器具需要容量高、工作寿命长、并且放电可以在一个恒定电压下进行的小而薄的电池。由于银的价格高，因此采用这一体系的大尺寸电池却受到了的限制。

锌氧化银原电池主要有扣式电池结构产品，其尺寸范围由 5～250mAh，而且该电化学体系的大多数产品目前都是使用一价氧化银（Ag_2O）制备的。

与一价氧化银相比较，二价氧化银（AgO）具有更高的理论比容量，因而同尺寸电池比一价氧化银电池能多输出约 40%的容量。但是它显示出两段电压曲线和在碱溶液中极不稳定的缺点。

3.1　化学原理

锌氧化银原电池主要由三种组分构成：粉末状金属锌负极、由氧化银压制成型的正极和溶有锌酸盐的氢氧化钾或氢氧化钠水溶液电解质。活性组分是装配在负极帽和正极壳体内，它们之间有一隔膜分开，并用塑料垫圈密封。

锌/一价氧化银电池的总电化学反应为

$$Zn+Ag_2O \longrightarrow 2Ag+ZnO \quad (1.59V)$$

锌/二价氧化银电池的电化学总反应分两步进行，如下所示

过程 1　$Zn+AgO \longrightarrow Ag_2O+ZnO$　(1.86V)

过程 2　$Zn+Ag_2O \longrightarrow 2Ag+ZnO$　(1.59V)

3.2　电池结构

典型的扣式锌/氧化银电池的剖面示于图 6.3-14 中。

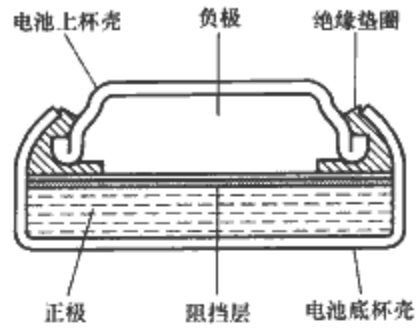


图 6.3-14　典型锌氧化银扣式电池的剖视图

扣式锌/氧化银电池通常设计为负极限制型，正极容量一般比负极容量多出 5%～10%。如果电池是正极限制型的，锌—镍或锌—铁电对可能在负极上形成，正极上就可能产生氢气。

锌氧化银电池的正极材料通常由一价氧化银（Ag_2O）和 1%～5%的石墨混合组成，石墨用作提高导电性。Ag_2O 中也可以含有二氧化锰（MnO_2）或高价氢氧化镍银（$AgNiO_2$）作为正极填充剂。正极物质中有时也采用一定比例的二价氧化银和一价氧化银的混合物，其中含有铅酸银（$Ag_5Pb_2O_6$）或金属银，以降低 AgO 正极的电压和电池内阻，但是这在商品电池中已不再使用。还可以向混合物中加入少量聚四氟乙烯作为粘合剂，它能使压片变得容易。

负极是一种高表面积、汞齐化的凝胶状金属锌粉，它置于顶盖的有效体积内，该顶盖用作电池负极的外部端子。顶盖是由三层金属组成的片材冲压成型的，其外表面是镍覆于钢上形成的保护层，其与锌直接接触的内表面是高纯铜或锡。正极片直接压到正极壳体内，该壳体由镀镍钢带成型而得，它也作为电池正极的端子。为了将正负极隔开，采用一片玻璃纸或接枝聚乙烯膜隔离层圆片放置在压实的正极上。整个体系都被氢氧化钾或氢氧化钠电解质润湿。

用一个密封绝缘垫圈使电池实现密封，防止电解质泄漏，并实现电池盖与电池壳体间的绝缘。绝缘垫圈可用一些弹性适宜的耐腐蚀材料，如尼龙制成。密封也可以通过采用密封剂涂敷在绝缘垫圈上而得到改善，可以采用的密封剂有聚酰胺或沥青，它们能防止电解质从密封表面泄漏。

3.3　工作特性

图 6.3-15 显示出 11.6mm×3.0mm 尺寸的一价锌氧化银扣式电池以恒电阻放电时的典型放电曲线，图上显示了这类电池典型的异常平稳的电压曲线，其他尺寸电池的电压特性是十分类似的。电池的工作寿命极大地依赖于电池尺寸和使用的负载电流大小。

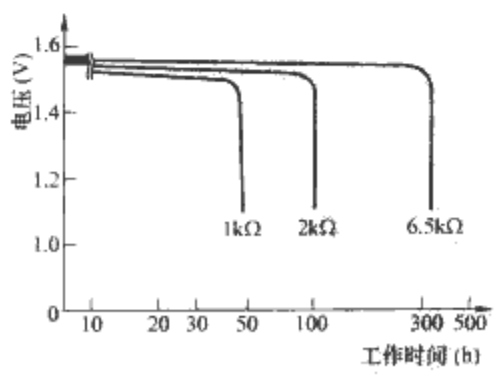


图 6.3-15　扣式锌/氧化银电池在 20℃下的典型放电曲线（尺寸为 11.6mm×3.0mm）

扣式锌/氧化银电池可以在宽广的温度范围内工作，在中等电流负载下，0℃时电池可以放出常温 20℃容量的 70%；−20℃时则可得到常温 20℃容量的 35%；但在重负载下容量损失会更大。在较高温度下，电池容量趋于加速衰减。

图 6.3-16 显示出采用氢氧化钠与氢氧化钾作电解质的处理二价氧化银电池的脉冲放电特性。低倍率电池比较适用于模拟式手表（2000Ω，7.8ms/s），它甚至可以在−10℃环境下工作；高倍率电池较适用于有背光照明的 LCD 手表（100Ω，2s/h 到 8h/天）。对连续照相机的电子快门机构、有背光照明的 LCD 手表以及某些模拟式手表等应用，除了要求低的背景电流外，还要求能提供短时间大电流脉冲。在这些情况下，脉冲工作末期的最低电压必须满足装置功能的适当要求。

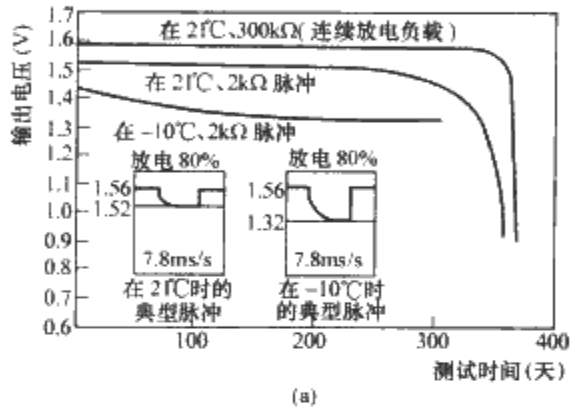


图 6.3-16 采用 NaOH 和 KOH 电解质的 Zn/AgO 电池的工作电压曲线（尺寸：7.8mm×3.6mm）

（a）NaOH 电池，模拟式手表制式；

（b）KOH 电池，有背光照明的 LCD 手表制式

由于碱溶液十分容易从密封处的毛细缝隙中爬出，引起电池的外部漏电和造成使用装置的腐蚀，因此曾经提出了改进密封技术和电池稳定性的要求，以便使手表电池贮存寿命能延长到 5 年。在搞清了温度与湿度对电池泄漏的影响后，发现电池泄漏是由于机械方式（密封不适当，密封处的纤维刮伤）或电化学方式（高氧含量或高湿度）引起的。经过改进后，当今设计的电池已经可以工作 5 年而不会漏液了。

高温贮存后或长期在室温下贮存后，这些电池的稳定性会受到正极稳定性和使用隔膜的影响。采用一价氧化银正极时，在 74℃下的氢氧化钾或氢氧化钠水溶液中的析气不是一个问题；而采用了多层高性能复合隔膜后，已经可以实现阻止银向锌的迁移。由此，新近得到的数据表明电池在 21℃下贮存 10 年是可能的。

3.4 扣式锌/氧化银电池的型号和尺寸及其特性

商品扣式锌/一价氧化银电池的型号和尺寸及其特性列于表 6.3-6 中。

表 6.3-6 商品扣式锌/一价氧化银电池的型号和尺寸及其特性

型号（IEC）	电流	额定负载（kΩ）	标称容量（mAh）	近似体积（cm^3）	最大尺寸（mm）	近似重量（g）
					直径×高度	
SR626	高	47	26	0.09	6.8×2.6	0.40
SR58	高	30	22	0.10	7.9×2.1	0.44
SR59	高	45	35	0.13	7.9×2.7	0.56
SR41	高	15	35	0.17	7.8×3.6	0.61
SR48	高	15	90	0.26	7.8×5.4	1.04
SR69	高	45	35	0.15	9.5×2.1	0.60
SR57	高	20	53	0.19	9.5×2.7	0.79
SR55	高	15	43	0.22	11.6×2.1	0.83
SR54	高	15	85	0.32	11.6×3.0	1.21
SF43	高	6.5	120	0.44	11.6×4.2	1.56
SR44	高	6.5	190	0.57	11.6×5.35	2.22
SR44	非常高	0.62	190	0.57	11.6×5.35	2.22
SR416	低	100	8.3	0.02	4.8×1.65	0.13
SR512	低	150	6	0.03	5.8×1.25	0.13
NA	低	70	11	0.04	5.8×1.65	0.18
NA	低	70	14	0.06	5.8×2.15	0.23
NA	低	70	16	0.07	5.8×2.7	0.26
SR65	低	70	14	0.06	6.8×1.65	0.24
SR60	低	70	19	0.08	6.8×2.15	0.33
SR66	低	45	26	0.09	6.8×2.6	0.40
SR721	低	100	9.5	0.06	7.9×1.25	0.23
SR714	低	68	13	0.07	7.9×1.45	0.30
SR67	低	70	16	0.08	7.9×1.65	0.32
SR58	低	70	22	0.10	7.9×2.1	0.44
SR59	低	45	35	0.13	7.9×2.7	0.56
NA	低	20	36	0.15	7.9×3.1	0.60
SR41	低	15	35	0.17	7.8×3.6	0.61
SR68	低	45	24	0.12	9.5×1.65	0.44
SR69	低	45	35	0.15	9.5×2.1	0.61
SR57	低	20	53	0.19	9.5×2.7	0.81
SR45	低	15	64	0.26	9.5×3.6	0.96
SR1116	低	30	30	0.17	11.6×1.65	0.70
SR55	低	20	43	0.22	11.6×2.1	0.80
SR54	低	15	85	0.32	11.6×3.0	1.21
SR42	低	15	105	0.38	11.6×3.6	1.35
SR43	低	6.8	110	0.44	11.6×4.2	1.68

4 其他锌负极原电池

4.1 锌/氧化汞电池

碱性锌/氧化汞电池以其单位体积容量高、电压输出异常平稳和贮存特性好而知名。虽然对该体系的了解已有一个多世纪，但是直到第二次世界大战期间才发展出实用的锌/氧化汞电池。从那时候起，锌/氧化汞电池已经使用在需要稳定的电压、长贮存寿命或高的容量一体积比例的许多应用场合。该电池体系的这些特性在诸如助听器、手表、照相机、某些早期的心脏起搏器和小型电子器具中得到了广泛应用，并显示出特别的优越性。该电池也被用作电压参考源和

在电器和电子装置中作电源，譬如声纳、应急标志灯、救援收发报机、收音机和救生装置等。然而由于氧化汞电池体系过高的价格，这些电池并没有广泛推广，只限于军事和特殊用途。

锌/氧化汞电池的开路电压为 1.35V，其开路或无负载时的电压异常稳定，几年内可保持在其初值的 1%以内（不小于初值的 99%）；而相对温度的稳定性甚至比相对时间的稳定性更好，从温度－20℃～50℃，总的无负载电压变化范围在 2.5mV 左右。因此这种电池曾经长期广泛用作二级标准参比电压，用于校正同一等级的测试仪器仪表。

在 20 世纪 80 年代末，氧化汞电池的市场已经几乎全部消失，主要原因是汞带来的环境问题，现在几乎没有再生产了。它们已经从国际电工技术委员会（IEC）和美国国家标准研究院（ANSI）的标准中除名。在原先应用该电池的装置中，已采用了碱性锌/二氧化锰电池、锌/空气和锂电池来取代它们。

4.2　锌/空气电池

锌/空气电池是通常称为金属燃料电池或金属/空气电池中的一种，虽然早在 20 世纪 30 年代已问世，但目前依然是各国学者和产业界努力发展的一个电化学体系。为便于论述与比较，特将其放在第 4 章“金属/空气电池”中介绍。

4.3　锌/氧化镍（Oxyhydroxide）电池

锌/氧化镍电池（简称锌镍电池）原先是作为蓄电池提出和发展起来的，直到 2004 年，日本松下电池公司首先推出了锌/氧化镍原电池产品，称为“Oxyride”，并已进入超级市场上销售。

锌/氧化镍电池的正极是由高价氧化镍和微细粒度的二氧化锰混合物构成，同样也加入少量石墨增加正极的导电性；负极是类似于碱性电池中采用的一种含锌粒的胶体，但加入到凝胶配方中的锌粉颗粒很细，以提高放电率，同时其中也加入了适当缓蚀剂；电池结构与碱性锌/二氧化锰电池完全相同。

该电池体系的总反应式为

$$2NiOOH+Zn+2H_2O \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2+Zn(OH)_2$$

该反应的电压约为 1.74V。

正极高价氧化镍（NiOOH）可以通过 $Ni(OH)_2$ 与臭氧（O_3），高锰酸钾（$KMnO_4$），过氧化氢（H_2O_2）等的反应制得，所得到的 NiOOH 为 β 或 γ 相。在正极组分中添加少量 $K_2S_2O_8$ 或 $KMnO_4$ 可以使 γ-NiOOH 相变得稳定。为了进一步增加 NiOOH 的导电性，在其表面上可以沉积一小部分的 CoOOH。

目前上市的产品有 R6(AA)和 R03(AAA)两种尺寸，可以和同尺寸碱性锌/二氧化锰电池等产品进行任意互换使用。图 6.3-17 表示出 R6 型电池典型的恒电阻放电放电曲线，图上同时绘出了同尺寸碱性锌/二氧化锰和普通锌/二氧化锰电池的放电曲线作比较。可以看出，显示更高的工作电压（比碱性锌/二氧化锰电池高出 0.2V，而比普通锌/二氧化锰电池高出 0.4V），由此在恒电阻情况下的放电电流也较大，由此虽然其容量低于碱性锌/二氧化锰电池，但输出能量依然较高。

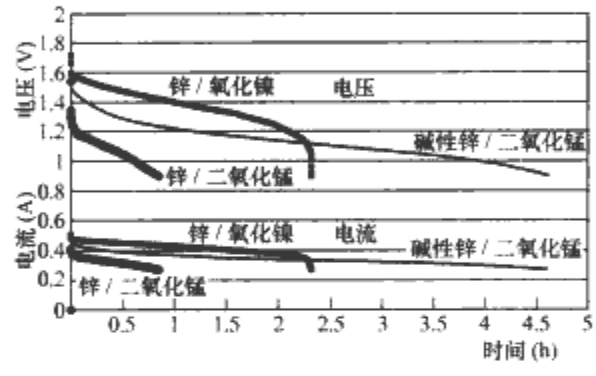


图 6.3-17　R6 尺寸锌/氧化镍、碱性锌/二氧化锰和普通锌/二氧化锰原电池的放电曲线

（放电负载电阻：3.9Ω）

2006 年春天松下公司又推出了新的和改进型锌/氧化镍原电池产品，专门设计用于重负载(如数码相机)的用途。测试表明采用该电池的照相机可以拍摄 187 张照片，在同样条件下，改进前的锌/氧化镍原电池产品拍摄了 153 张；金霸王公司的著名品牌碱性锌/二氧化锰电池只拍摄了 104 张。这显然说明了锌/氧化镍电池具有优越的性能。

目前，我国也已经推出自主开发和生产的这种电池产品，并推荐用于数码电器产品。

第 4 章 金属/空气电池

金属/空气电池由具有反应活性的负极和空气电极构成的电池，它的正极反应物氧气来自大气环境，是用之不尽的。因此世界各国学者和电池工业界一直致力于对这一体系的开发，表 6.4-1 列示了金属/空气电池体系的主要优点和缺点。

已经研究和开发过的金属/空气电池有原电池、贮备电池、可充电电池和机械充电电池等。在机械充电电池设计(即，更换放完电的金属负极)中，电池的功能本质上相当于原电池，它的空气电极为相对简单的"单功能"电极，只需要在放电模式下工作。常规可充电金属/空气电池需要一个第三电极(用来维持充电时放出氧气)或者一个"双功能"电极(一个既可以还原氧又可以放出氧的电极)。

表 6.4-2 列举了被认为可以用于金属/空气电池的活性金属以及它们的一些特性。金属/空气电池中，商品化的锌/空气作为一种原电池已经应用了多年。最初，这些产品是使用碱作为电解质的大型电池，应用于铁路信号灯和航标系统等。随着薄电极技术的问世，应用于助听器、传呼机等用途的扣式原电池实现了产业化。

人们对锂/空气、钙/空气和镁/空气电池都已经有过研究，但到目前为止，诸如负极的极化或不稳定、伴生腐蚀或非均匀溶解、安全性等问题和成本高阻碍了商业产品的发展。铁/空气电池体系的电压和比能量过低，没有引起太多关注。但铝的地质储量丰富(地壳中储量第三的元素)、具有成本低潜力，而且加工比较容易，因而铝的应用一直受到重视。然而铝/空电池充电电压太高，故主要集中于发展贮备式一次电池和机械充电式电池技术。

表 6.4-1 金属/空气电池的主要优点和缺点

优 点	缺 点
高体积比能量 放电电压平稳 极板寿命长(干态贮存) 无生态问题 低成本(以所使用的金属为基础) 操作范围内，容量与载荷和温度无关	依赖于环境条件：一旦暴露在空气中，电解质干涸缩短极板寿命；电极被淹会减小输出功率 功率输出有限 操作温度范围窄 负极腐蚀产生氢 碱性电解质碳酸化

表 6.4-2 可用于金属/空气电池中的不同金属负极材料的特性

金属负极	金属电化学当量 (Ah/g)	热力学电池电位 (V①)	价态变化	金属理论比能量 (kWh/kg)	实际工作电位 (V)
Li	3.86	3.4	1	13.0	2.4
Ca	1.34	3.4	2	4.6	2.0
Mg	2.20	3.1	2	6.8	1.2～1.4
Al	2.98	2.7	3	8.1	1.1～1.4
Zn	0.82	1.6	2	1.3	1.0～1.2
Fe	0.96	1.3	2	1.2	1.0

① 氧气正极电池电压。

1 锌/空气电池——扣式电池

锌/空气电池是直接使用空气中的氧气参与产生电能的电化学反应装置，由此电池上必须有允许空气进入的孔和通道，使氧气可以穿过并扩散到电池的正极与电解质交接面参加反应。由于一种活性物质是在电池外面，所以这种电池内的体积大部分可用于安置另一种活性物质(锌)，由此锌/空气电池具有非常高的比能量。事实上它在许多应用中，已成为原电池体系中输出最高实际比能量的一个品种；此外还有放电电压平稳，贮存寿命长，安全和对环境无影响以及成本低等优点。但是因为电池是对大气环境开放的，所以这也影响到电池的性能和限制了它的使用。

早在 19 世纪初叶，就已经发现了空气中的氧气可以具有电化学体系中的去极剂效能。可是直到 1878 年才设计出一个电池，在该电池中用多孔镀铂碳空气电极替代著名的普通锌/二氧化锰电池中的二氧气化锰电极。后来一直到 1932 年才由 Heise 和 Schumacher 设计出碱性电解液的锌/空气电池，该电池采用蜡浸渍的多孔碳空气正极，以防止碳空气正极孔隙中充满液体。现在的大型工业用锌/空气电池几乎未加改变地采用了这种设计，它们可以输出很高的比能量，但只能输出很低的功率。由此，常用作铁路遥控信号设备和航标设备的电源。

当今的扣式锌/空气电池采用了燃料电池的研究成果，采用了集疏水性和气孔率于一体的聚四氟乙烯粘结高性能薄型气体扩散电极，而且已经发展了制备这种混合物的一种连续制造工艺。这一技术的最初应用曾集中于便携式军事用途，但很快就转向了消费电子装置中的应用，由此导致了小型电池的开发与应用，并使其成为当今一种主要的原电池产品。小型锌/空气电池最成功的应用乃是医疗和通信方面的用途，扣式锌/空气电池现在已成为耳聋助听器的主导电源；在医院里，9V 扣式锌/空气电池组用作心脏搏动遥测仪的电源，该仪器用于对病人的连续监视；另一种锌/空气电池组则用做骨骼刺激生长仪的电源，该仪器可帮助断裂的骨头愈合。在通信领域，锌/空气硬币式电池用于"蓝牙"的无线头戴受话器，蓝牙是一种低功率无线电子装置。

1.1 化学原理

由于氧气取自于空气，因此对也使用碱性电解质溶液的锌/空气电池来说，只要增加负极的用锌量就会增大电池容量。电池中的空气正极本身只作为反应场所，其实际尺寸和电化学性质在放电过程中可以保持不变，因此理论上空气正极有无限的使用寿命。一般电池反应可简化表示如下

正极 $1/2\ O_2 + H_2O + 2e \longrightarrow 2OH^-$ $E^0 = 0.4V$

负极 $Zn \longrightarrow Zn^{2+} + 2e$

$Zn^{2+} + 2OH^- \longrightarrow Zn(OH)_2$ $E^0 = 1.25V$

$Zn(OH)_2 \longrightarrow ZnO + H_2O$

总反应 $Zn + 1/2\ O_2 \longrightarrow ZnO$ $E^0 = 1.65V$

然而实际上空气正极上的反应是复杂的，氧气的还原过程中有一系列中间步骤，其中存在着影响整个反应的速率控

制步骤。为了加速整个反应的速率，在空气正极中使用了催化剂化合物来加快控制步骤的反应速率。这些催化剂是典型的金属化合物或络合物，例如元素银，氧化钴，贵金属和它们的化合物，混合金属化合物，包括了稀土金属、过渡族金属大环化合物、尖晶石、二氧化锰、酞花青和钙钛矿等。

1.2　电池结构

当今小型锌/空气电池存在许多结构类型，由扣式电池到硬币式电池以及正在发展的圆柱形（R6 型和 R03 型）以及方形电池（参见第 4 章有关内容）。

扣式锌/空气电池的结构十分类似于其他扣式锌负极电池，如图 6.4-1 和图 6.4-2 所示，在图 6.4-1 中还示有锌/金属氧气化物电池结构图作比较。由比较不难看出，锌/空气电池使用很薄的正极（厚度约 5mm），允许负极空间的锌用量是相当锌/氧化汞电池中的两倍，由此其比能量至少增加了一倍。

但设计中必须在负极内部留出一部分空间，以容纳电池放电过程中锌转变成氧化锌时发生的膨胀，一般为负极空间总体积的 15%～20%。

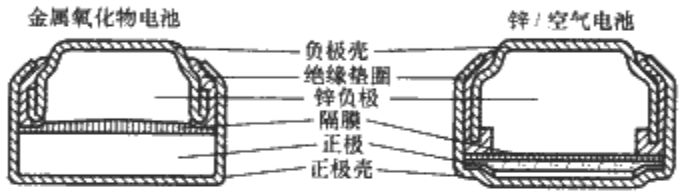


图 6.4-1　锌/空气电池正极部分的放大剖面图

正极结构中包括隔膜、催化层、金属网、疏水膜、扩散膜和空气分散层。其中，电极的催化层由碳与锰的氧化物混合物构成；电极通过加入分散得很细的聚四氟乙烯微粒而产生疏水性；金属网构成结构支架并且作为集流体；疏水膜保持空气和电解液之间的界面，能使气体透过，但防止水的进入；扩散膜调节空气扩散速度（如果用气孔调节气体扩散，就不使用该膜）；空气分散层可以把氧气均匀地分散到正极表面。随着技术的进步，近来空气电极又引进了双层结构而得到了进一步改进。

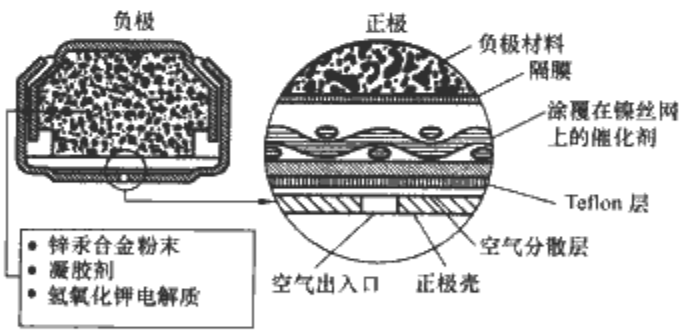


图 6.4-2　扣式锌/空气电池的关键部分结构图

锌/空气电池正极端面上的进气孔为氧气进入电池，并扩散到正极催化剂表面提供了一条通道。由于放电电流与氧气消耗量成正比，所以调节氧气扩散就能确定锌/空气电池的最大的连续电流极限。其极限电流也是正极催化活性的函数，采用适当的催化剂可以促使过氧化氢的分解速度加快，从而提高电池的放电率。

1.3　工作特性

锌/空气电池的额定开路电压是 1.45V，20℃下的工作电压范围为 1.1～1.4V，典型的终止电压为 0.9V。

扣式锌/空气电池在 20℃的一组典型放电曲线示于图 6.4-3 中，可以看出放电曲线是比较平稳的。当工作电流选取在低于极限电流的范围内，电池放出了大约相同的容量。同时看出放电电流越大，工作电压越低，这是所有电池体系的共同特性。在放电电流接近极限电流时，观察到由于电池极化增大，电压下降显著；同时获得的容量减低。

在图 6.4-4 中同时绘出了锌/空气、锌/氧化汞和锌/氧化银电池的放电曲线，以作对比。用标明的负载电流连续放电时，锌/空气电池的放电时间乃是其他同尺寸电池的两倍。虽然 DA13 电池的体积只有其他电池的一半，但其性能却超过了较大的锌/金属氧化物电池。

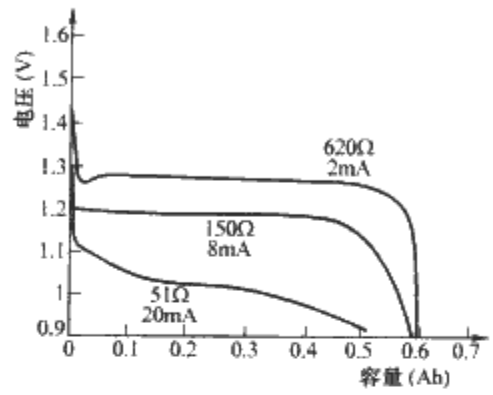


图 6.4-3　在 20℃、三种不同负载下，PR44 型扣式锌/空气电池放电曲线
（同时标出了平均放电电流）

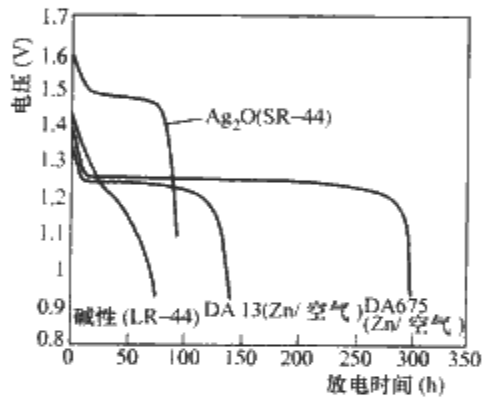


图 6.4-4　在 20℃、620Ω 负载下放电时扣式电池的性能[LR－44，SR－44 和 PR44(DA－675)为 11.6mm×5.4mm；DA－13 为 7.9mm×5.4mm]

锌/空气电池在使用中遇到的最大问题是在使用中的工作寿命，特别是间歇使用条件下的工作寿命缩短问题。引起这种现象的主要原因有以下几方面：

（1）电解质溶液的碳酸化作用。空气中二氧气化碳的浓度大约为 0.04%，与碱性溶液（电解质）起反应形成碱金属碳酸盐和碳酸氢盐。锌/空气电池使用碳酸化电解液能够满意地放电，但过度碳酸化会带来两大问题：①电解液的蒸汽压升高，促使水蒸气在低湿度条件下损耗；②正极结构里形成的碳酸盐结晶会阻碍空气的进入，最后引起正极损伤，随之正极性能下降。

（2）直接氧气化作用。锌/空气电池的锌负极可直接被氧气氧化，氧气进入电池后可以溶于电解液，并通过电解液进行扩散。在 25℃下年容量损失小于额定容量的 1.5%，而在 37.5℃下年容量损失小于 5%。

（3）水蒸气迁移对使用寿命的影响。决定有效使用寿命的衰降机理是水蒸气迁移。当电解液蒸汽压和周围环境之间存在分压差时就产生水蒸气迁移。采用典型电解质的电池，电解质由 30%浓度氢氧气化钾组成，在室温下，当湿度低于 60%时会损失水分，而在 60%以上的湿度下会增加水分。水分过分减少会增大电解液的浓度，并且因为维持放电反应的电解质不足，最后会使电池失效；相反，若水分过分增加就会稀释电解液，也会降低电导率。此外，空气正极的催化

剂层在水分持续增加的情况下会淹没，降低电化学活性，最后使电池失效。

由以上因素的综合影响，在环境条件下预测每年容量损失小于 4%，锌/空气电池典型的有效使用寿命如表 6.4-3 所示，大约只有 3 个月。

电池在贮存期间的气孔可以密封起来，以防止气体迁移引起的衰降。密封电池采用的典型材料是聚酯胶带。显然这与一般电池不同，由于在贮存期间锌/空气电池的反应物之一氧气被隔离在电池外，所以这使锌/空气电池在常温下具有极好的贮存寿命。高温会显著增大自放电反应速度，电池在 54℃贮存 28 天后的容量损失平均约 3%。现在已可以通过在其他性能参数和电池与电池组设计部件选择之间的权衡，使电池的高温贮存寿命得到改善和最佳化。

1.4 电池的尺寸、型号与特性

实用型锌/空气扣式和硬币式电池有各种不同的尺寸，容量范围从 40～1100mAh。表 6.4-3 列出常用电池的物理和电特性。一般来说，较小的尺寸通常用作助听器电池，中等和较大尺寸则用于连续放电用途，比如传呼机或遥测装置。

表 6.4-3 扣式和硬币式锌/空气电池尺寸、型号与特性

a 1.4V 的标准单体电池

IEC 型号	ANSI 型号	标称直径 (mm)	标称高度 (mm)	平均质量 (g)	额定容量 (mAh)	标准电流 (mA)	极限电流 (mA)	工作时间 (月)
PR63		5.7	2.0	—	42	0.4	—	1—2
PR70	7005ZD	5.7	3.5	0.3	70	0.4	2	1—2
PR41	7002ZD	7.7	3.9	0.6	134	0.8	7	1—2
PR48	7000ZD	7.7	5.2	0.9	260	0.8	12	1—2
PR44	7003ZD	11.4	5.2	1.8	600	2	22	2—3
PR2330		23.2	3.0	—	960	4	—	1—2
PR1662		16.0	6.2	3.5	1100	4	—	2—3

b 1.4V 的大容量锌/空气电池

ANSI 型号	最大直径 ANSI (mm)	最大高度 ANSI (mm)	额定容量 (mAh)
7005ZD	5.8	3.6	90
7002ZD	7.9	3.6	160
7000ZD	7.9	5.4	290
7003ZD	11.6	5.4	630

第一个商业上成功的硬币式锌/空气电池于 1989 年问世，PR2330 硬币式电池已经成为信用卡式的传呼机的主导电源。PR44 型锌/空气电池是最普通的耳聋助听器电源，同时也曾用于传呼机。袖珍遥测心脏监测仪采用 9V 锌/空气电池，可将病人的数据通过袖珍无线电发射机传送到基站的监测器上。由两个以上单体锌/空气电池构成的电池组的数据列入表 6.4-4 中。

表 6.4-4 扣式锌/空气电池组的尺寸、型号与特性

型号	ANSI 序号	电压 (V)	最大尺寸 (mm)	平均质量 (g)	额定容量 (mAh)	标准电流 (mA)	工作时间 (min)
DA164	—	5.6	ϕ16.8×44.5	20	950	3	1～2
DA146	7004Z	8.4	长 26.5，宽 17.5，高 48.5	36	1500	6	1～2

2 锌/空气电池——方形和圆柱形电池

20 世纪 90 年代后期开始问世了商品化的 5～30Ah 的方形锌/空电池以及更大型的工业用原电池，同时一直也在研制着可实用化的圆柱形锌/空电池等产品。在这一期间，人们还努力寻求使这些电池成为可充电电池，既可供便携使用、又可供电动车使用。但锌的充电（或替换）控制和有效的高倍率双功能空气电极的发展仍然是一个难题和挑战。在一些设计中，使用第三电极供氧气逸出，以有利于给电池负极充电或者在电池外进行充电，从而不需要使用双功能空气电极。避开再充电难题的另一个方法是机械式充电，即取出耗完的锌电极和（或者）放电产物，替换上新的电极。

2.1 便携式锌/空气原电池

图 6.4-5 是方形锌/空气电池的基本示意图。它采用金属或者塑料托盘来盛装金属负极/电解质混合物，隔膜和正极则粘接于托盘的边缘。锌/空气电池的负极/电解质混合物与碱性锌负极原电池中使用的负极混合物类似，都是将锌粉混入凝胶化的氢氧化钾电解质中形成的。电池的正极是一个薄层的气体扩散电极，包含活性层和阻挡层两层。与电解质相接触的正极活性层采用高比表面积碳和金属氧化物催化剂，并用聚四氟乙烯粘合在一起。阻挡层与空气相接触，由聚四氟乙烯粘接的碳组成。高密度聚四氟乙烯阻止电解质从电池中渗出。方形锌/空气电池可以实现中等放电率和高容量的设计。电池的厚度决定了负极的容量，而端面面积决定了最大放电率。

除方形锌/空气原电池外，还发展了圆柱形结构电池，如图 6.4-6 所示。

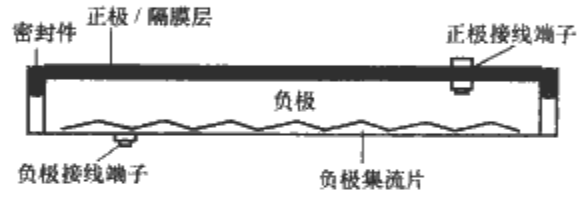


图 6.4-5 方形锌/空气原电池设计示意图

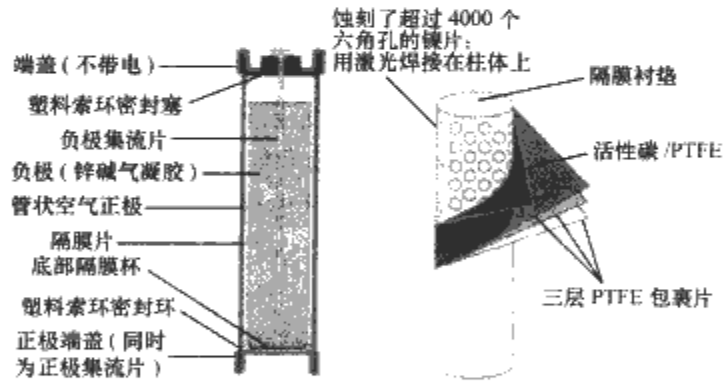


图 6.4-6 圆柱形锌/空气原电池设计示意图

对许多便携式电子设备应用场合，锌/空气原电池比能量高、成本低而且安全，是一个不错的选择。由于锌/空气电池能实现高比能量和体积比能量，受环境（干涸、淹池和碳酸化）的影响小，因此在需要使用电源 1～14 天的场合，它特别具有优势。25℃下锌/空气电池的典型放电曲线如图 6.4-7 所示，整个放电过程的大部分时段，电池的电压较为平坦。在适当放电条件下，这类电池的实际比能量常可高达 300～400Wh/kg 和 600～800Wh/L，如图 6.4-8 所示。

2.2 工业锌/空气原电池

大型锌/空气原电池已经使用了许多年，它被用来为铁路信号、地震遥感探测、海上航标和远程通信等场合提供低倍率、长寿命的电源。它们有水激活（含干态氢氧化钾）或者预先激活两种形式。预先激活形式的电池也可以使用凝胶电解质来减小可能发生的电解质泄漏。同时新型电池已采用其他添加剂和合金来替代汞，达到同样减少氢气的产生和锌的腐蚀目的。

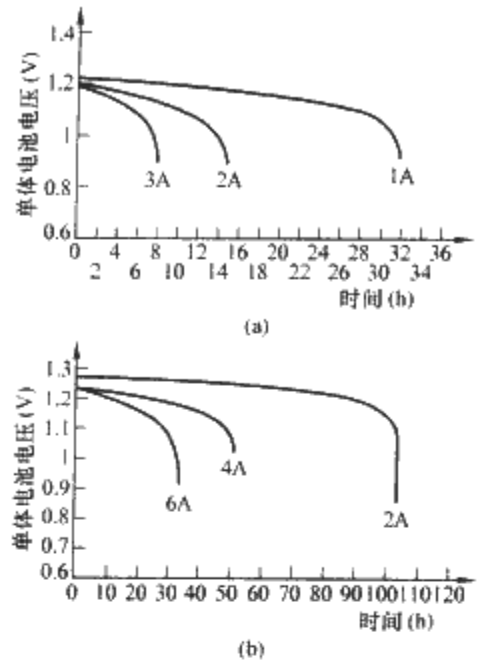


图 6.4-7　25℃下方形锌/空气原电池的放电曲线
(a) 高倍率单体电池；(b) 大容量单体电池

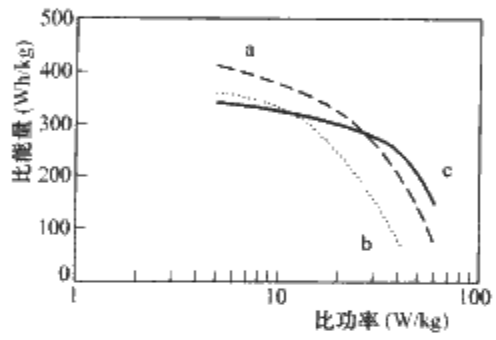


图 6.4-8　单体锌/空气原电池的输出比特性
a—35Ah 方形电池；b—5Ah 方形电池；c—5Ah "AA" 电池

2.2.1　预先激活和水激活电池

典型的预先激活工业锌/空气电池，容量 1100Ah，有两电池和三电池结构两种，如图 6.4-9 所示。电池箱和盖子由有色透明的丙烯酸塑料模压而成。这种构造的特征是采用了浸腊碳正极块、固体锌负极和充满石灰的贮液器。电池通常有一个石灰床，用来吸收二氧化碳、从溶液除去可溶性锌化合物，并将它们沉淀为锌酸钙。电池采用透明的箱体，便于目视监测电解质的高度和荷电状态。电池的荷电状态可以通过观察锌板和石灰床的情况来监测，当石灰转化为锌酸盐后，石灰床变暗。

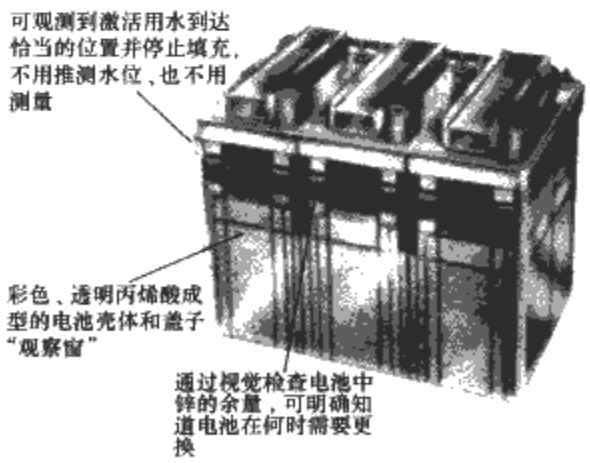


图 6.4-9　激活式方形大容量锌/空气电池外形

水激活电池和电池组是以密封态交付给用户，其中碱性电解质（氢氧化钾）和石灰呈干态。使用时将电池密封处揭开，加水使氢氧化钾溶解即可激活电池，所需要维护的只是定期的检查和加水。

这些电池一般制成 1100Ah，并可以将多个电池串联或者并联得到电池组。电池组在 25℃下的最大连续放电率为 0.75A。一个有 3 只单电池的预先激活 1100Ah 电池组的质量约 2kg，比能量约 180Wh/kg。

2.2.2　凝胶电解质电池

另一种方式是使用凝胶电解质，来降低电池操作过程中电解质可能发生的泄漏。锌电极由混有胶凝剂和电解质的锌粉构成，反应产物是氧化锌而不是锌酸钙。电池在制造时就贮满了电解质。电池容量一般设计为 1200Ah，通过串联或并联构成实用的电池组。这种类型电池由于使用了多孔锌电极，直接生成了反应产物氧化锌，故比能量高于水激活型。在低放电倍率下，其输出比能量可以达到 285Wh/kg。

2.3　混合空气/氧化锰原电池

锌/空气原电池的另一条技术途径是使用含大量氧化锰的混合正极。在低放电率下工作时，电池按照锌/空气电池模式运行；在高放电率下当氧耗尽后，正极功能转由氧化锰取代。由此电池在低放电率下获得锌/空气电池的容量，在高电流脉冲后，氧化锰经空气氧化获得部分再生，从而恢复脉冲电流能力。

图 6.4-10 是一个平板型电池的侧面图，一般单体电池和电池组的容量可以设计为 40～4800Ah。与类似碱性锌/二氧化锰电池和普通锌/二氧化锰干电池在中等倍率放电时的性能相比（见图 6.4-11），该体系电池的比能量可高达 350Wh/kg。

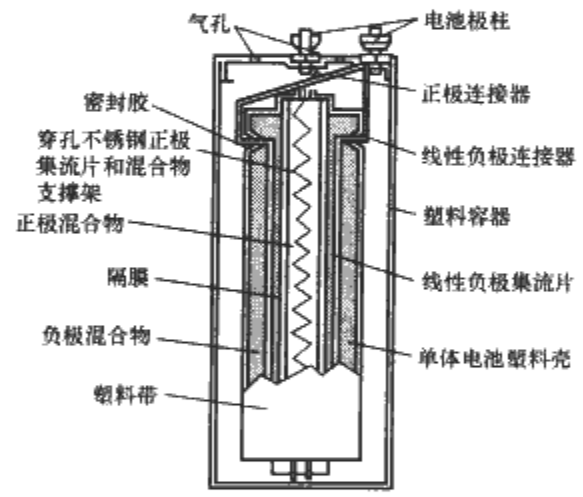


图 6.4-10　混合锌/空气-二氧化锰电池示意图

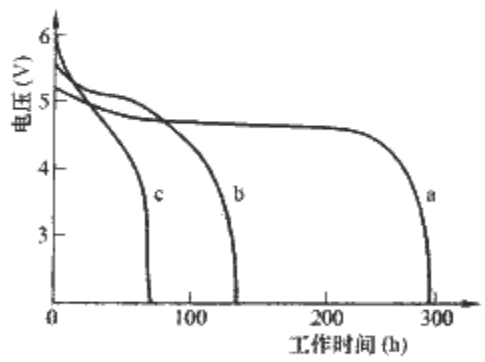


图 6.4-11　混合锌/空气-二氧化锰电池的典型放电曲线
a—空气-碱性电池；b—碱性锌/二氧化锰电池；
c—重负载型锌、二氧化锰电池

2.4　负极可更换式锌/空气电池

采用更换放过电的负极或者放电产物的方式，可以实现锌/空气原电池的重复使用，这种电池又称为机械充电式锌/空气蓄电池。放过电的负极或者放电产物可以被充电或者在电池外面回收。这样可以不需要双功能空气电极，也可避免锌电极充放电循环引起的形变问题。

这种电池一般设计成双单体电池，然后通过若干双单体

电池的串连提供所需要的电压。如图 6.4-12 所示，每个双单体电池有两个并联的空气电极，并由塑料框架支撑。它们一起形成了一个容纳锌负极的封套。负极是具有多孔结构的锌，它包裹于具有吸收能力的隔离物中，插在两个正极之间。电解质 KOH 以干态存在于锌负极中，只需要加水即可激活电池。通过取出使用过的负极、洗涤电池和装上新的负极就可继续使用该电池。

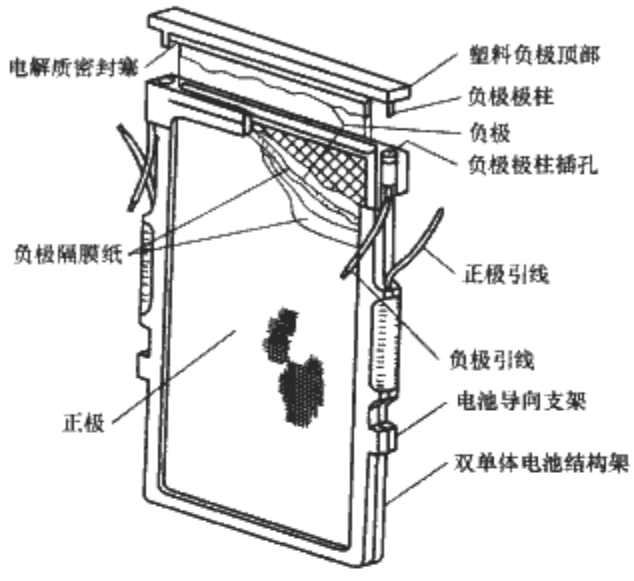


图 6.4-12 一个典型的双单体锌/空气电池结构示意图

用作纯电动车的锌/空气电池采用了这种负极可更换式相似的设计，在车队服务点或者公共服务站可以进行负极的更换，保证车辆的继续正常运行。对取出的负极可在服务于地区配送网点的中心工厂内，采用高效的电解锌工艺，对其进行电化学再生。

这种锌/空气电池组由电池堆模块构成，每个模块含有一串独立的双电池。每个双电池由夹在空气正极之间的负极盒和隔离层组成，负极盒内有锌基电解质浆料。浆料保存在固定床中，不需要循环。此外，电池组还含有供给空气和热管理的子系统，而且电池组也进行了改进，便于快速更换电池盒。

一个重 650kg 满容量为 264V 110kWh 的电池组在一改装为电机驱动的厢式货车中进行过技术评估。电池的比能量为 230Wh/kg 和 230Wh/L，比功率 100W/kg。

3 铝/空气电池

铝作为电池负极具有较高的理论容量、电压以及比能量，因而一直受到人们的关注。但由于铝负极在电解质水溶液中会析出氢气，所以电池被设计成在使用前加注电解质，或者在每次放电结束后重新更换铝负极进行“机械式”充电。可充电的铝/空气电池不能使用水溶液体系的电解质。

铝/空气电池放电反应方程式如下

负极 $Al \longrightarrow Al^{3+} + 3e$

正极 $O_2 + 2H_2O + 4e \longrightarrow 4OH^-$

总反应 $4Al + 3O_2 + 6H_2O \longrightarrow 4Al(OH)_3$

伴生的析氢反应方程式为

$$Al + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3/2H_2$$

铝可以在中性（盐）溶液以及碱溶液中放电，但因为在中性（盐）溶液的开路腐蚀速率较低，与高浓度碱电解质相比，它的稳定性相对较高。中性电解质体系的电池主要针对诸如海洋浮标以及便携式电源的低功率应用，水下运输工具动力和其他场合应用的海水电池。

碱性电解质体系的优点在于电导率更高和反应产物氢氧化铝的溶解度较高，因此使电池可能具有高功率输出的能力，可以考虑用作备用电源、水下无人运载器的推进动力以及电动车辆推进动力等，其比能量可达 400Wh/kg。

3.1 中性电解质铝/空气电池

采用中性电解质的铝/空气电池已经在便携式设备、固定电源和海洋用途等方面应用。这种电池采用了显示低极化的铝合金负极，它可以使电池的理论容量利用率达到50%～80%；然而在中性电解质中铝合金的腐蚀反应直接导致了氢的析出，而且腐蚀速率与电流密度成正比，在电流为零时也几乎为零。

正极一般是令人满意的，但是在中性电解质溶液中对其也有一些特殊要求。由于与金属网接触的活性物质的电位过高，会导致金属网被氧化，因此推荐在开路的情况下仍以较小的电流放电，就能有效地防止正极电位在开路时升得过高。

电解质为 12%的氯化钠溶液，它的电导率接近了最大值。由于电解质电导率的限制，电池的电流密度限定在30～50mA/cm^2。这种电池也可以在海水中使用，但电流密度将明显受海水电导率的制约。

由于反应产物氢氧化铝的影响，必须对电解质进行管理。一般可以通过将电解质与反应产物倾倒出电池，并重新注入更多的电解质来继续放电，直到合金负极中的铝全部消耗掉；如果不排空电解质而继续放电，电池也可以完好地放电到总电量约 0.2Ah/cm^3，此时电池内部将几乎变成固体状。

目前已经设计了多种采用中性电解质的电池。一般而言，它们被制备成贮备电池并且通过注入电解质来激活。如图 6.4-13 是一个设计专门用于为镉镍或铅酸蓄电池进行野外充电的一种典型盐水电池。若金属负极以及电解质盐充足，以干态质量计算，其比能量约为 600Wh/kg。

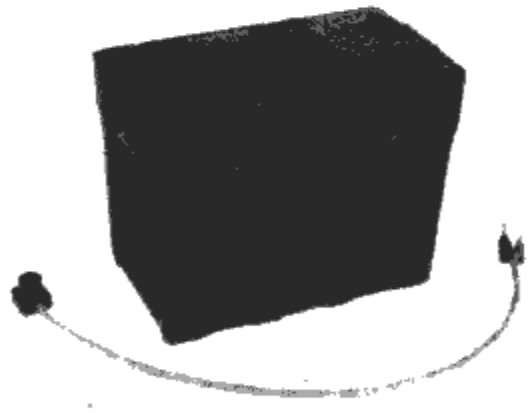


图 6.4-13 一个典型的 600Wh、6V 的铝/空气电池

3.2 碱性电解质铝/空气电池

碱性电解质铝/空气电池的运行原理在 20 世纪 70 年代初就已明了，但遇到一系列技术难题，影响了其商品化进程。这包括负极在碱性电解质中较高的腐蚀速率、薄型大面积空气电极制备难以及处理和消除电池反应产物的困难等。

铝合金在碱性电解质中腐蚀速率的研究已取得了重大进展，含锰和锡的铝合金在开路情况下的腐蚀电流较之以前降低了大约 2 个数量级，并且在较宽的电流密度范围内其库仑效率超过 98%。接着使铝能够以片状或小球状连续地添加到电池中的技术也得已开发成功。图 6.4-14 是 50℃下，使用 8mol/L 含锡酸盐的 KOH 电解质时电池的性能。电池的

电极面积为 360cm²、每隔 20min 自动添加铝球负极，它能在 1.35V、56A 的电流下放电 110h。

由于随着反应产物浓度的增加，电解质电导率下降，因此从电解质中移出反应产物，对电解质进行管理是必要的。如图 6.4-15 所示，如果不移出反应产物，电池的电压则会下降。

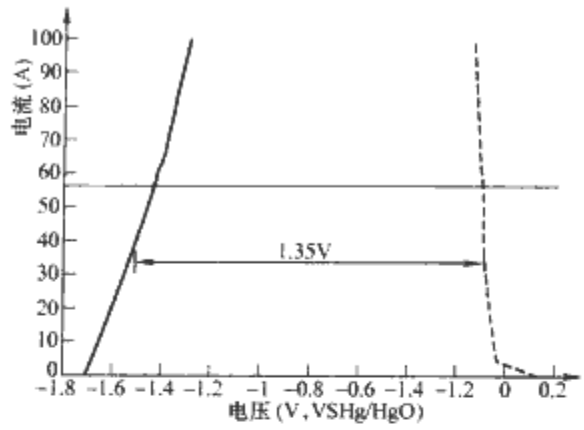


图 6.4-14　颗粒装填式铝/空气电池极化曲线
（····正极；——负极）

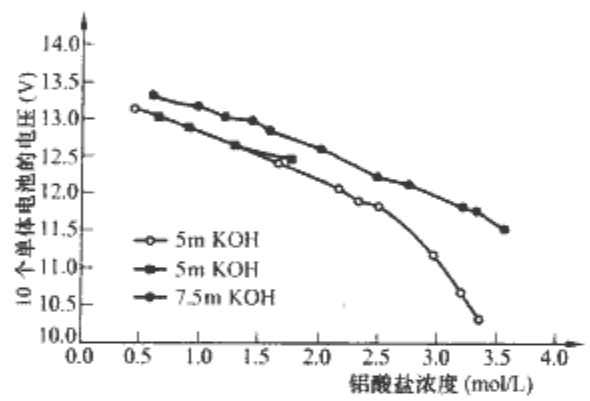


图 6.4-15　电池电压与铝酸盐浓度关系曲线

4　镁/空气电池

镁/空气电池的放电反应机理如下

负极　　$Mg \longrightarrow Mg^{2+} + 2e$

正极　　$O_2 + 2H_2O + 4e \longrightarrow 4OH^-$

总反应　　$2Mg + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2Mg(OH)_2$

这个反应的理论电压是 3.1V，但实际上开路电压只有 1.6V。实际情况下镁负极与电解质会直接反应生成氢氧化镁和氢气

$$Mg + 2H_2O \longrightarrow Mg(OH)_2 + H_2$$

当电极表面形成一层钝化膜［$Mg(OH)_2$］时，即阻止了该反应的继续发生。这一表面形成的膜也会使电池负载电流增大，产生电压滞后效应。这是由于电流的增加必须破坏这层钝化膜，使镁电极形成能参与反应的新鲜表面。“纯”镁负极的性能通常并不理想，现已开发出多种镁合金负极以满足所需要的特性。

镁/空气电池目前还没有成功地实现商业化，但正在努力将其应用于水下系统，并试图利用海水中的溶解氧作为反应物。这种电池采用镁合金负极、催化膜正极，并以海水来激活。这种系统的优点主要是除镁以外，所有的反应物均由海水提供，所以其理论比能量可高达 700Wh/kg。

5　锂/空气电池

锂/空气电池是非常有吸引力的一种电池，这是因为在所有金属空气电池的负极中锂有最高的理论电位和电化学当量（3860Ah/kg）。在水溶液电解质中，电池放电的反应方程式为

$$4Li + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4LiOH \quad E^0 = 3.35V$$

在放电过程中，金属锂、氧气和水被消耗产生 LiOH。由于金属表面有一层保护膜的生成，可以减低腐蚀反应的快速发生，使电池电化学反应效率升高。但是在开路状态下和低功率状态下，金属锂的自放电速度极快，这是因为伴有如下化学腐蚀反应

$$Li + H_2O \longrightarrow LiOH + 1/2H_2$$

这一反应的发生势必降低电池负极的库仑效率，因此若要获得锂负极的最高利用率，就必须控制此反应。同时，电池贮存时必须排干电解质。

锂/空气电池的理论开路电压为 3.35V，但因为电池电压表现为锂负极与正极的混合电势，实际上无法达到这个值。电池实际开路电压在 2.85V 附近，电池的主要电压损失在正极上，如果不能减小正极极化，电池在 2.2V 以上时放电效率不高。近年来研究表明，当锂的表面上沉积一层具有离子导电性的薄膜，可以在水溶液中隔断与水的直接接触，从而显示出锂/空气电池的电压可以接近 3V，为进一步发展实用性锂/空气电池和其他锂在水溶液中的电池体系提供了可能。此外，采用有机电解质体系的锂/空气电池也在积极研究之中，初步结果显示它还可能发展成蓄电池体系。

第 5 章 锂 原 电 池

由于金属锂的质量轻、电压高（与适当正极配对）、电化学当量高和导电性高，所以将其作为电池的负极活性物质颇具吸引力。由于上述优越的特性，在 20 世纪最后 20 年期间，对高性能原电池和蓄电池研制中，采用锂的体系曾独占鳌头。

然而，锂是属于碱金属的一种，化学性质异常活泼，其中锂与水反应剧烈，释放出氢气，生成氢氧化锂。反应机理如下

$$2Li+2H_2O \longrightarrow 2LiOH+H_2$$

上述反应不如钠与水的反应那样剧烈，这可能是由于其溶解度较低，从而使 LiOH 产物在某些条件下能附着在锂表面之故。然而该反应产生的热可以点燃反应生成的氢气，并可以使锂也燃烧起来。因此，锂的操作必须在干燥气氛中进行，并且在电池中必须采用非水电解质（锂/水电池是一个例外）。

锂为负极的原电池在诸多方面都优越于传统电池组。

（1）电压高：与大多数原电池的电压为 1.5V 相比，采用适当正极活性物质的锂电池电压高达 3.9V，显然由于单体电池电压较高，通常可使电池组中的单体电池数量减少 1/2。

（2）比能量高：锂电池输出比能量（超过 200Wh/kg 和 400Wh/L）比传统的锌负极电池的高 2～4 倍或更多。

（3）工作温度范围宽广：多数锂电池能在高于 70℃ 和 −40℃工作，有些甚至可在 150℃下工作，而另有一些可在更低的温度−80℃下工作。

（4）比功率高：一些特别设计的锂电池能够在大电流和高功率放电条件下输出其能量。

（5）平稳的放电性能：大多数锂电池都显示平坦的放电曲线（在放电过程的大部分时间内电压和电阻保持不变）。

（6）贮存寿命长：锂电池有长的贮存寿命，即使在高温下也能长期贮存。在室温下贮存达到 10 年的寿命数据已经获得，而在 70℃下贮存 1 年的结果也已经获得。从可靠性分析出发，可以预计其贮存寿命能达到 20 年。

高比能量电池体系的研制工作始于 20 世纪 60 年代，并都集中在采用锂作为负极的非水电池体系方面。20 世纪 70 年代初期，锂电池首先有针对性地用于了军事用途。但是对它们的实际应用仅局限于具有适当结构设计和配方，同时相应的安全问题也得到进一步解决的电池。最近，已经有了采用不同化学配方、具有不同尺寸和外形设计的锂原电池和电池组，其尺寸范围从 5mAh 至20 000Ah；外形尺寸范围从用作存贮器和便携式设备电源的小型扣式和圆柱形电池，到用作导弹发射井备用和应急电源的大型方形电池。

由于锂原电池具有优良的性能和特点，其应用范围越来越大，其中包括照相机、存贮器备用电源、安全器具、计算器、手表等。然而，由于其初始成本较高和人们对安全的担忧，以及随着其他竞争体系的技术进步，其中特别是碱性二氧化锰电池的价格趋于合理，致使锂电池并没有达到原先预期的市场占有率。

1 锂原电池的分类与安全注意事项

1.1 锂原电池的分类

锂原电池一般都选择非水溶剂的电解质体系，其中有代表性的有机溶剂有乙腈和碳酸丙烯酯等；无机溶剂有亚硫酸氯和硫酰氯等。为了使电解质具有要求的导电性，必须添加溶解于溶剂的溶质。此外，锂原电池中也有一类是直接采用固体锂离子导体做电解质的体系。锂电池采用的正极活性物质有多样性，其中采用最普遍的是二氧化锰、亚硫酰氯、二氧化硫和一氟化碳等。显然，“锂电池”是采用锂负极电池的总称，只是正极活性物质、电解质、化学配方、结构以及物理和机械性能上各不相同。

根据电解质（或溶剂）的类型和所采用的正极活性物质，锂原电池可以分成以下几种基本类型：

（1）可溶正极电池。这类电池采用液体或气体正极材料，例如二氧化硫或亚硫酰氯，它们可以溶解电解质盐，既是正极活性物质，又是电解质的溶剂。

（2）固体正极电池。第二类锂负极原电池不是采用可溶气体或液体物质，而是采用固体物质作为正极。由于正极活性物质是固体，电池内部一般无压力形成，从而显示无须实施气密性密封的优点，但它却不具备可溶正极电池的高放电率性能。

（3）固体电解质电池。这些电池公认有极其长的贮存寿命，贮存时间可超过 20 年，但只能以微安级的极低放电率放电。这些电池可应用于存贮器备用电源，心脏起搏器以及要求小电流、长寿命的类似电子器具。

在图 6.5-1 中，绘出了上述三种类型锂电池尺寸或容量大小（到 30Ah）相应于典型放电电流水平的关系图形。并且也表示出了每一类电池使用锂的近似质量。

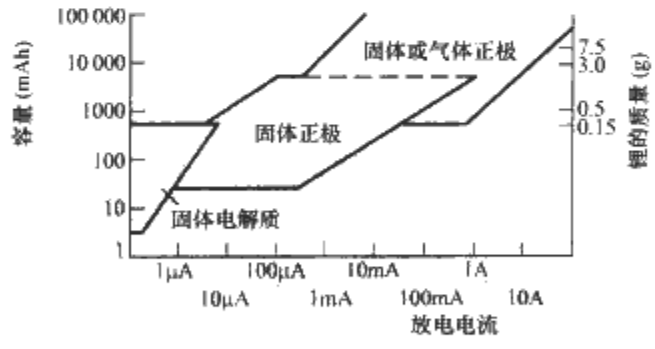


图 6.5-1 锂原电池的分类与其基本特性

1.2 锂原电池的安全注意事项

应该说一般商品锂原电池的安全与可靠性都非常高，这是因为它们多数只是单个电池使用，一般不会出现诸如过放电等滥用条件；同时即使发生外部短路，也因内部设计合适不会有任何危险发生。

然而毕竟锂原电池是一种高比能量电池，同时金属锂又是化学活泼性高的金属，其熔点只有 180.5℃。因此，对锂电池的安全要给于特别关注。对某些作特殊应用的锂原电池

体系，特别是具有高放电率结构设计和以组合形式使用的情况下，这种关注是非常重要的，否则可能出现严重的安全事故，包括人身安全事故。在对特殊用途的锂原电池的安全注意中，首先要做好电池的选择与电池组的设计，包括：①选择适当的锂电池体系，注意到特定的化学性质和电池成分对电池工作的安全性影响；同时电池中锂的量越少，意味能量越小，电池也就越安全。②选择恰当的组合电池设计，其中电池尺寸容量应尽可能小、单体数量尽可能少、同时必须安置具有防止外部短路与过放电等的保护装置等。其次，在使用中必须采取预防措施避免机械和电滥用，包括防止高放电率放电或短路、强制过放电导致电压反极、充电、过热或焚烧以及其他机械滥用，以保证电池组安全和可靠工作。此外，由于锂电池的某些成份是有毒甚至是易燃，因此必须避免电池内部出现高温。

2 锂二氧化硫（Li/SO_2）电池

锂二氧化硫体系是锂原电池中较为先进的一种，但由于其内部含有有毒物质（乙腈和 SO_2 等）和存在一定的安全隐患，因此它主要用于军事及某些特殊民用用途（如高空气球探测等）。这种电池的质量与体积比能量分别高达 260Wh/kg 和 415Wh/L。Li/SO_2 电池尤其是以具有大电流放电能力、卓越的低温性能与长贮存寿命而知名。

2.1 化学原理

Li/SO_2 电池采用锂作为负极，采用一个多孔碳作为正极载体和二氧化硫作为正极活性物质。电池反应机理如下

$$2Li+SO_2 \longrightarrow Li_2S_2O_4 \downarrow \text{（连二亚硫酸锂）}$$

该电池体系采用由二氧化硫和有机溶剂（典型材料如乙腈）与溶解其中的溴化锂组成的非水电解质。这种电解质的导是率较高，随着温度的下降较慢，这为电池优良的高放电率和低温性能提供了条件。在电解质中有约 70% 质量的 SO_2 去极剂，由于液态 SO_2 存在蒸汽压力，20℃下在一个尚未放电的电池中可引起的内压为 $(3\sim4)\times10^5$ Pa。但随着放电进行，SO_2 得到利用，电池压力随之下降。在锂化学计量限制的电极设计中，一种情况是当可用的锂全部用完，放电随及终止；另一种情况是由于放电产物沉积致使正极堵塞时（正极限制）放电终止。现在的典型设计采用正极限制，以至于放电终止时仍然有部分锂剩余。由于锂和 SO_2 起始反应在负极上形成一层连二亚硫酸锂保护膜，它可以阻止电池贮存期间的进一步反应和容量损失，因此 Li/SO_2 电池显示极长的贮存寿命。

2.2 电池结构

Li/SO_2 电池一般设计成如图 6.5-2 所示的圆柱形构型，其中电极采用卷绕式结构，是由金属锂箔，一层微孔聚丙烯隔膜、聚四氟乙烯与碳黑混合物压在铝拉网骨架上形成的正极和第二层隔膜螺旋形地卷绕而成的。然后将卷绕极组插入镀镍钢外壳内，再将正极极耳和负极极耳分别焊接到玻璃/金属绝缘子的中央棒及电池内壁上，以实现各自的电连接。最后将壳体与顶盖焊接在一起后，注入含有去极剂 SO_2 的电解质。

一般在电池壳体壁或底部上设计与加工了薄弱刻痕（起安全阀作用），当内部压力达到典型值 2.41MPa（350psi）时，该薄弱刻痕就会打开排气。这种高的内部压力是由诸如过热或短路等不适当的滥用而引起的，设计的薄弱刻痕大约在 95℃时打开，该温度已大大超过电池工作和贮存的上限

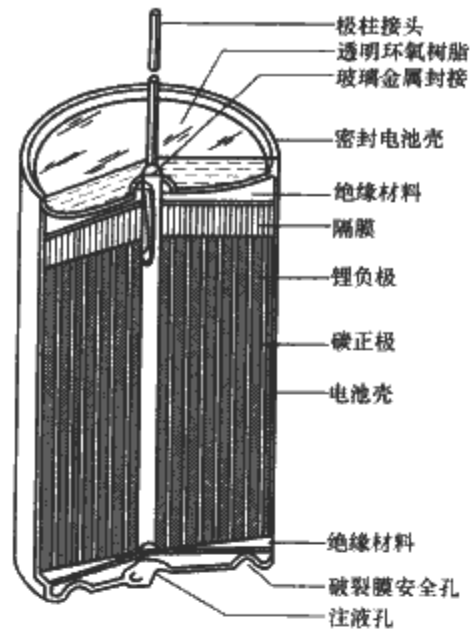


图 6.5-2 锂/二氧化硫电池的剖面图

温度，通过排气可以防止电池本身的破裂或爆炸。另外，对使用的玻璃绝缘子，必须采用一种耐腐蚀玻璃或用保护性涂层涂敷玻璃，用其防止当电池壳体与玻璃一金属绝缘子中央棒之间存在电位差时，玻璃发生锂化作用。

2.3 工作性能

Li/SO_2 电池的突出工作性能表现为：

（1）工作电压高和放电电压平稳，如图6.5-3（a)所示。该图给出了 Li/SO_2 电池在 20℃下的典型放电曲线，在宽广的放电电流范围内，电池放电曲线度十分平稳。

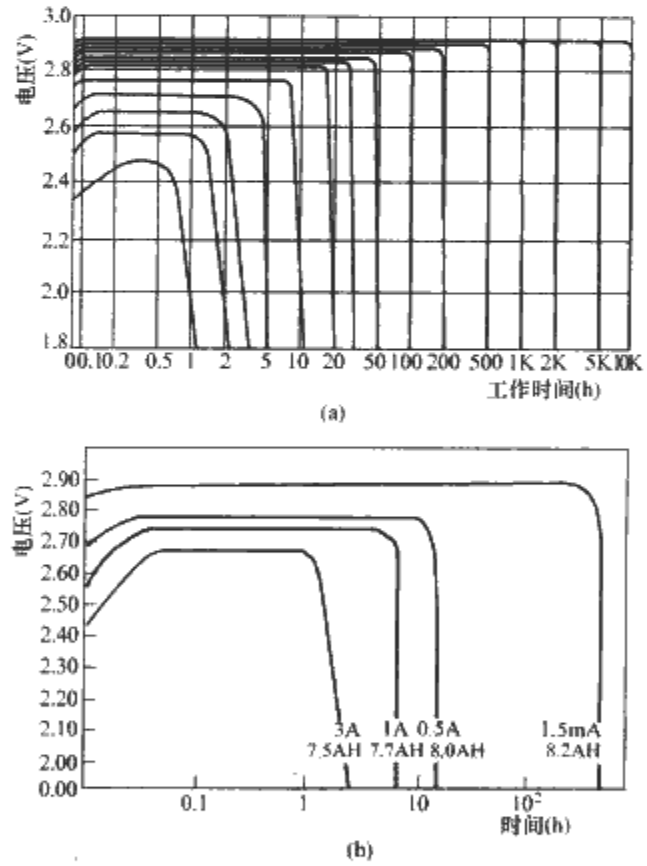


图 6.5-3 在 20℃下、以不同负载放电时 Li/SO_2 电池的典型放电特性
（a）一般电池；（b）高倍率型电池

（2）能以高放电率放电，并显示高的利用率，如图 6.5-3（b)所示。该图给出了高放电率电池以 4C 率高达 3A 放电的放电曲线。而且它还能够以高达 37.5A 的脉冲电流放电，提供高达 59W 的脉冲输出功率；可是，对于高放电率结构，当电池在放电率大于 2h 率延长放电时，有可能引起电池过热。实际上热量的升高状况与电池组结构、放电方

式、温度和电压等有关。一般应该对这种电池组的结构和使用予以控制，以避免电池过热。

（3）电池具有优异的温度特性。它既可以在宽广的温度范围内工作，又能在极低温度下保持较高的的放电率能力和良好的放电性能，如图 6.5-4 和图 6.5-5 所示。

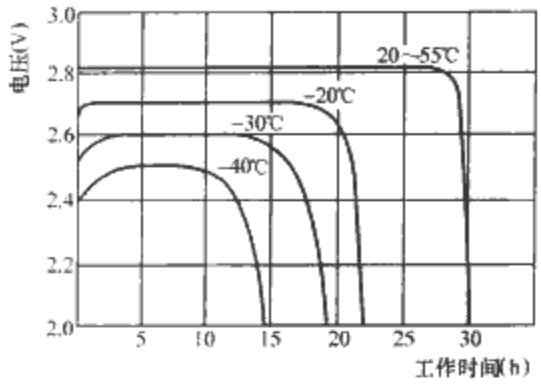


图 6.5-4 以 C/30 放电率放电时，Li/SO_2 电池在不同温度下的放电性能

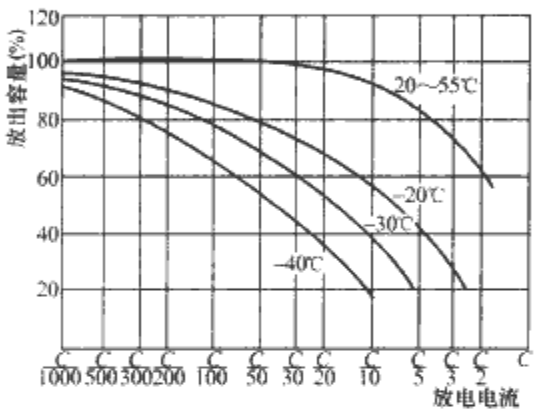


图 6.5-5 Li/SO_2 电池在不同温度和负载下放电时在不同温度下的放电性能

（4）Li/SO_2 电池具有长的贮存寿命。由于 Li/SO_2 电池采用气密性密封，而且在其贮存期间受到负极上所形成的钝化膜的保护，所以贮存期间容量损失甚微。由 5 个小 D 型电池串联而成的电池组贮存 14 年后的数据已获得，当在室温和 2A 下放电时，其容量损失仅为 8%，但在低温下几乎无容量损失。这种电池甚至可在高达 70℃ 的温度下贮存，在 70℃ 高温下贮存 1 个月后，电池容量保持在 92%；而贮存 5 个月后，其容量还可保持在 77%。即使在 85℃ 高温下贮存 1 个月后，电池容量也可保持在 82%。

Li/SO_2 电池的工作性能中也存在一个明显的缺点，即电池在高温下长期贮存以后，放电时，尤其是以大电流和低温放电时，将使达到它的标称工作电压出现滞后现象。这种起动滞后或称作电压滞后的现象是由锂负极上所形成的保护膜增厚（这种特性使 Li/SO_2 电池具有卓越的贮存寿命）所引起的。一个电池具体的滞后时间不可能准确预测，因为它取决于电池的新旧、电池特有的结构和部件，贮存的时间和温度，放电的电流以及温度等。一般来说，电池在－20℃ 以上的温度下以中等放电率到低放电率放电时，电压滞后甚微或不存在。即使是在 70℃ 下贮存 1 年以后的电池，在 20℃ 下放电也没有明显的电压滞后现象。电池在 70℃ 下贮存 8 周后，在－30℃ 以小于 40h 率的电流放电，滞后时间小于 200ms。但以较高放电率放电时，电压滞后时间随电池贮存温度和时间的增加而增加。例如，在以 2h 率放电时，在 70℃ 下贮存 8 周后的电池，其最长的起动时间大约为 80s；贮存 2 周后的电池，其最长的起动时间为 7s。因为滞后现象只出现在长期贮存以后的电池上，因此也提出了一系列有针对性的消除方法，其中一个途径是通过对贮存后的电池进行预处理来消除，即用较高的放电率对电池作短期放电至其达到工作电压为止。

2.4 电池产品的型号和尺寸

Li/SO_2 电池可制成许多型号的圆柱形电池，其容量范围可在 35Ah 之内。大多数电池产品是根据 ANSI（美国全国标准协会）标准，采用现行传统锌原电池的尺寸制造的，包括 C 型系列，如 1/3C（0.86Ah）、2/3C（2.0Ah）、C（3.5Ah）、5/4C（4.5Ah）、D 型（7.5～9.0Ah）、F 型（11.0Ah）和 DD 型（16.0Ah）等。这些单体电池在尺寸上虽与传统锌原电池可互换，但在电气参数上则不能互换，因为锂电池的电压较高（锂电池标称电压为 3V，传统锌电池仅 1.5V）。目前 Li/SO_2 电池主要是以军事用途为主，如无线电收发机和便携式监视装置等。同时，也可用于高空气象探测装置。

3 锂/亚硫酰氯（$Li/SOCl_2$）电池

锂/亚硫酰氯（$Li/SOCl_2$）电池是实际应用电池系列中工作电压最高（3.6V）和比能量最高的一种电池（比能量可达 590Wh/kg 和 1100Wh/L）。这一最高的比能量值是由大容量、低放电率型大尺寸电池获得的。

$Li/SOCl_2$ 电池可以制成各种各样的尺寸和结构，容量范围从低至 400mAh 的圆柱形碳包式和卷绕式电极结构电池，到高达10 000Ah 的方形电池以及许多可满足特殊要求的特殊尺寸和结构的电池。亚硫酰氯体系原本存在安全与电压滞后两大问题，其中安全问题特别容易在高放电率下和过放电时发生；而电压滞后现象则出现于电池经高温贮存后继续在低温放电的场合。

低放电率商品化电池已成功地使用了很多年，主要用于存贮器的备用电源和其他要求长工作寿命的用途。大型方形电池作为应急备用电源已经用于军事用途。

3.1 化学原理

$Li/SOCl_2$ 电池由锂负极，碳正极和一种非水的液体 $SOCl_2/LiAlCl_4$ 电解质组成。亚硫酰氯既是电解质，又是正极活性物质。负极、正极和 $SOCl_2$ 的成分取决于制造商以及期望电池所获得的性能等不同而定。其中包括催化剂或其他一些物质已被应用在碳正极或电解质中，以提高电极和电池的性能。

该电池的公认的总反应式为

$$4Li+2SOCl_2 \longrightarrow 4LiCl\downarrow +S+SO_2$$

其中，硫和二氧化硫溶解在过量的亚硫酰氯电解质中，但产生的二氧化硫会形成有一定程度的内压。可是，氯化锂是不溶的，当它形成时，便会沉积在多孔碳黑正极内。在某些电池结构中和在某些放电条件下，这种正极的堵塞是电池工作或容量受限制的因素。硫作为放电产物的形成也会出现一个问题，因为硫可能与锂反应，这一反应可导致热失控。

在贮存期间锂负极一经与电解质接触，就与亚硫酰氯电解质反应生成 LiCl，锂负极即受到在其上面形成的 LiCl 膜的保护。如同 Li/SO_2 电池一样，这一钝化膜有益于电池的贮存寿命，但在放电开始时会引起电压滞后，在高温下长期贮存后的电池，在低温下放电，其电压滞后现象尤其明显。

所用电解质低的冰点（－110℃ 以下）及其高的沸点（78.8℃）使得电池能够在一个宽广的温度范围内工作。随着温度的下降，电解质的导是率只有轻微的减小。$Li/SOCl_2$ 电池的某些组分是有毒和易燃的，因此应避免剖解电池或将

排气阀已打开的电池与电池组分暴露到空气中。

3.2 电池结构

商品 $Li/SOCl_2$ 电池主要采用圆柱形碳包式结构，而圆柱卷绕式电池结构和大容量方形电池结构以及其他特殊结构设计多用于军事用途。本节中将只介绍前面两种电池结构。

图 6.5-6 为圆柱形碳包式 $Li/SOCl_2$ 电池的结构特征。负极由锂箔制成，紧贴在不锈钢或镀镍钢外壳的内壁上；隔膜由非编织玻璃丝布制成；正极由聚四氟乙烯粘接的碳黑组成，呈圆柱状，有极高的空隙率，并占据了电池的大部分体积。电池为气密性密封，而正极柱采用玻璃—金属密封绝缘子。这些低放电率电池有很高的安全度，一般可以不设计安全阀。

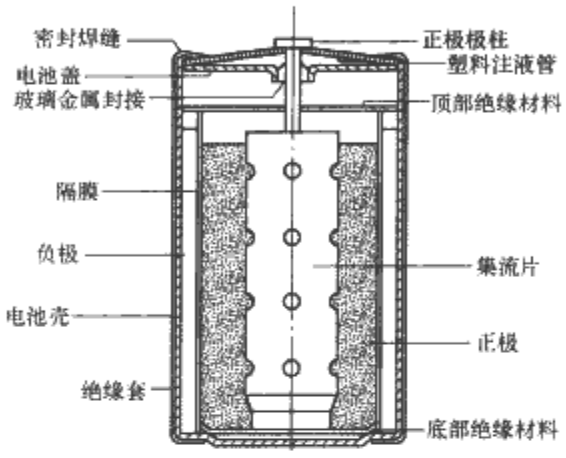


图 6.5-6 碳包式 $Li/SOCl_2$ 电池截面图

图 6.5-7 为圆柱形卷绕式 $Li/SOCl_2$ 电池的结构特征，其使用的正负极与隔膜材料与碳包电池基本相同，而电极制成带状后的卷绕方式与卷绕式 Li/SO_2 电池一样；电池壳体是由不锈钢制成的；正极极柱使用了耐腐蚀的玻璃金属绝缘子；电池盖用激光焊接以保证气密封性。安全装置，例如泄露孔、熔断丝或者 PTC 装置等都安装在了电池内部以保护电池在有内部高气压和外短路时电池结构的安全。

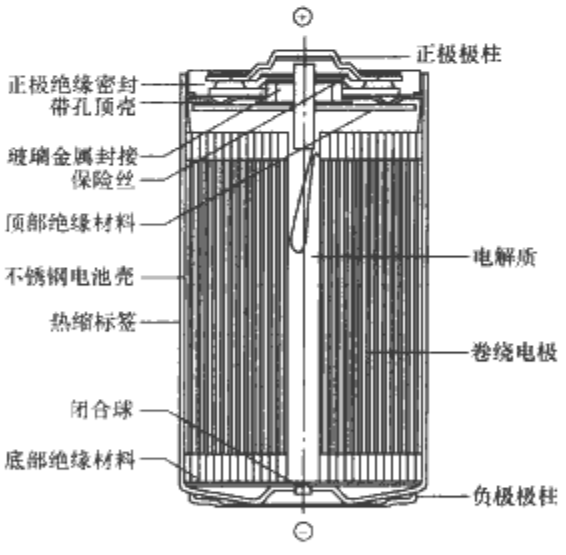


图 6.5-7 卷绕式锂/亚硫酰氯电池剖视图

3.3 工作性能

$Li/SOCl_2$ 电池的开路电压为 3.65V；典型的工作电压范围在 3.3～3.6V 之间（至终止电压 3V）。图 6.5-8（a）和（b）分别给出了 D 型和 AA 型碳包式 $Li/SOCl_2$ 电池的典型放电曲线。在较低至中等放电率下放电，电池显示出非常平坦的放电曲线和优良的性能。

图 6.5-9 给出了在－30℃～72℃温度范围内的电池容量与电流的关系曲线。如图所示，$Li/SOCl_2$ 电池不仅能在宽广的温度范围内工作，而且既显示出良好的低温性能

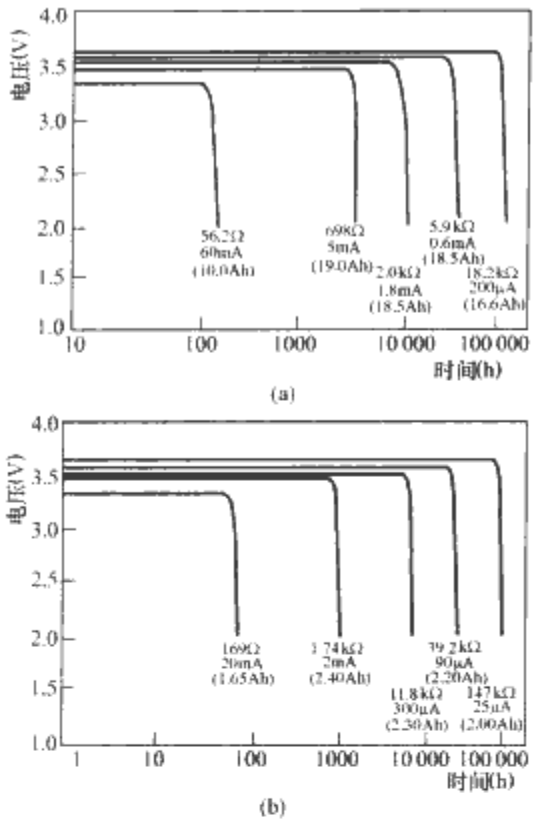


图 6.5-8 25℃下，$Li/SOCl_2$ 电池的典型放电曲线
（a）D 型碳包式高容量电池；（b）AA 型碳包式高容量电池

（－30℃下，1mA 级放电容量高于常温容量；10mA 级放电容量为常温容量的近 70%；80mA 下仍然可达同等电流下的常温容量的 40%左右），又显示出优异的高温性能（72℃下，1mA 级放电容量可达同等电流下的常温容量的 70%左右；10mA 级放电容量为常温容量的近 60%；而 80mA 下却可达同等电流下的常温容量的 80%左右）。数据表明该电池还可以在更高的温度下很好的工作，如图 6.5-10 所示。在 145℃下，电池以高放电率放电时，可放出其大部分的容量；而以低放电率放电（放电 20 天）可放出超过 70%的容量。由此，可以将 $Li/SOCl_2$ 电池制作成特殊电池组，在石油探测等温度不超过 150℃、但受到高冲击和振动的情况下使用。

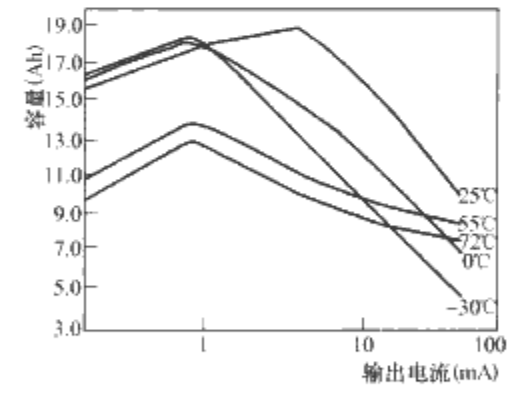


图 6.5-9 在不同温度下，D 型碳包式高容量电池与输出电流的关系曲线图

锂表面形成的一层 LiCl 保护膜，是 $Li/SOCl_2$ 电池贮存寿命长的根本原因。电池其他组分的稳定性也是贮存寿命长的重要因素，例如电池外壳和盖子是通过锂得到正极保护的，而且碳、不锈钢集流网以及玻璃材料隔膜在电解质中都是惰性的。图 6.5-11 表示电池在 20℃下贮存 3 年后的容量损失，每年大约损失 1%～2%。在 70℃下贮存，每年大约损失 30%的容量，但容量损失率随着贮存时间的增加而减少。同时推荐电池最好以立式姿势贮存，侧放或颠倒贮存会引起容量损失。

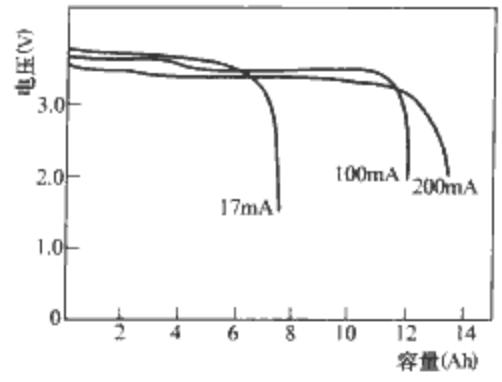


图 6.5-10 在 145℃下，D 型碳包式 $Li/SOCl_2$ 放电特性 $Li/SOCl_2$ 电池的放电特性

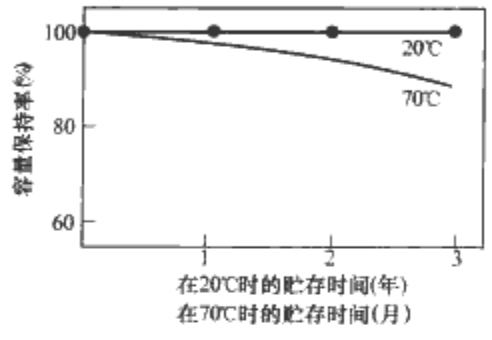


图 6.5-11 圆柱形碳包式 $Li/SOCl_2$ 电池的容量保持率

采用卷绕式电极结构设计的电池可以在中等至高放电率下工作，特别可以满足军用和某些民用要求的高电流输出和低温下工作的场合。图 6.5-12 给出了卷绕式 D 型电池的典型放电曲线，同样显示出 $Li/SOCl_2$ 电池体系特有的平坦电压特征。同时与碳包式结构电池相比较（见图 6.5-10），显然卷绕式结构电池在中等电流下和在低温下的性能都更好一些，如图 6.5-12（a）和（b）所示。图 6.5-12（a）和（b）中还特别附上了一个小插图，它给出了初始加负载时的电压响应曲线，由于负极采用了一种特殊的涂层技术，使电池的闭路电压能在 10s 内恢复到正常值。

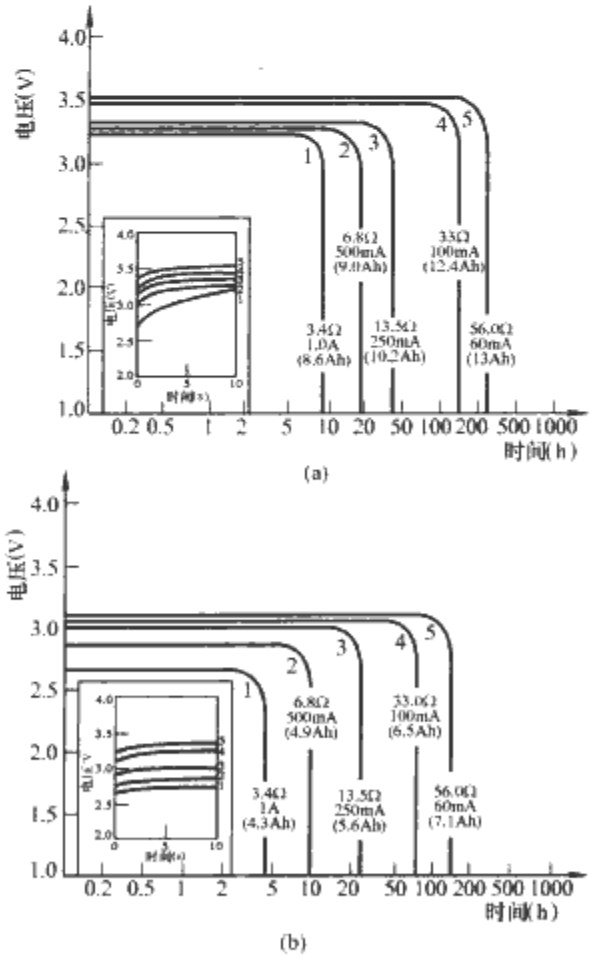


图 6.5-12 在中等放电率下，D 型卷绕式 $Li/SOCl_2$ 电池的典型放电特性
（a）25℃；（b）−40℃

3.4 电池的型号、尺寸及其特性

3.4.1 碳包式 $Li/SOCl_2$ 电池

表 6.5-1 列出了商品碳包式 $Li/SOCl_2$ 电池的型号、尺寸及其特性。由表可以看出，包括特种电池和电池组外形（例如在印制电路板上安装）在内，碳包式 $Li/SOCl_2$ 电池都是按 ANSI 标准尺寸制造的。它们与传统锌系列电池虽然在尺寸上能互换，但由于锂电池电压较高，从电气特性上则不能互换。

这些电池是为低、中放电率放电设计的，不得高于 $C/100$ 率放电。它们具有高比能量，例如，D 型电池以 3.5V 的电压可释放出 19.0Ah 的容量，与此相比，传统锌/碱性二氧化锰电池以 1.5V 的电压只能释放出 15Ah 的容量。

表 6.5-1 碳包式 $Li/SOCl_2$ 圆柱形电池性能

型 号	$\frac{1}{2}$AA	$\frac{2}{3}$AA	AA	C	$\frac{1}{6}$D	D
在 $C/1000$ 放电率下的额定容量(Ah)	1.2	1.65	2.40	8.5	1.7	19.0
尺寸（最大）						
直径（mm）	14.5	14.5	14.5	26.2	32.9	32.9
高度（mm）	25.2	33.5	50.5	50	10.0	61.5
体积（cm^3）	4.16	5.53	8.34	27.0	8.50	52.3
质量（g）	9.2	11.8	17.6	50.5	21.5	92.5
连续放电时的最大电流（mA）	50	75	100	230	—	230
质量比能量（Wh/kg）	456	490	475	590	275	720
体积比能量（Wh/L）	1010	1045	1010	1100	700	1270

碳包式 $Li/SOCl_2$ 电池具有高电压（3.6V）、高比能量（300～700Wh/kg）、长贮存寿命（10 年）和安全的优点。已广泛应用作 CMOS 存储器、水与电等计量仪表和诸如高速公路过境自动电子交费系统、程序逻辑控制器和无线安全报警系统等的无线电频率识别（RFID）器的电源。

3.4.2 卷绕式 $Li/SOCl_2$ 电池

表 6.5-2 列出了商品卷绕式 $Li/SOCl_2$ 电池的型号、尺寸及其特性。由表可以看出，卷绕式 $Li/SOCl_2$ 电池也是按 ANSI 标准尺寸制造的。

表 6.5-2 商品卷绕式 $Li/SOCl_2$ 电池的型号、尺寸和特性

型 号	1/3C	C	D
在 20℃时的额定容量（Ah）	1.15	5.5	13.0
尺寸（最大）			
直径（mm）	26.2	26.0	33.1
高度（mm）	18.9	49.9	61.4
体积（cm^3）	10.2	26.5	52.8
质量（g）	24	51	100
连续使用时的最大电流（mA）	400	800	1800
比能量			
质量比能量（Wh/kg）	168	377	455
体积比能量（Wh/L）	395	726	860
推荐工作温度范围（℃）		−60～+85	

中、高放电率的卷绕式圆柱形电池和方形大容量 $Li/SOCl_2$ 电池主要应用在军事领域，同时也在民用领域的一些特殊应用场合得到应用。

3.5 $Li/SOCl_2$ 电池的衍生产品系列

3.5.1 锂/硫酰氯（Li/SO_2Cl_2）电池

Li/SO_2Cl_2 电池与亚硫酰氯电池相似，采用锂负极，碳正极和 $LiAlCl_4$ 溶于 SO_2Cl_2 中作为电解质。而 SO_2Cl_2 同时又是去极化剂，其放电机理为

负极　$Li \longrightarrow Li^+ + e$

正极　$SO_2Cl_2 + 2e \longrightarrow 2Cl^- + 2SO_2$

总反应　$2Li + SO_2Cl_2 \longrightarrow 2LiCl + SO_2$

其开路电压为 3.909V。

3.5.2 采用卤素添加剂的锂/氯氧化物电池

另一种锂/氯氧化物电池的衍生体系包括在 $SOCl_2$ 和 SO_2Cl_2 电解质中采用卤素添加剂来提高电池性能，达到提高电池电压和提高比能量的效果。如添加 BrCl 的 $Li/SOCl_2$ 电池（简称 BCX 电池）的电压提高到 3.9V，在 20℃下以低电流放电的比能量达到 486Wh/kg 和 1070Wh/L；添加 Cl_2 的 Li/SO_2Cl_2 电池（简称 CSC 电池）的电压提高到 3.95V；电池比能量提高到 480Wh/kg 和 1040Wh/L。

锂/氯氧化物电池设计为全密封、卷绕式电极圆柱形结构、尺寸范围自 AA 到 DD（双 D 型），容量最高达 30Ah。设计含 0.5gLi 的 AA 型电池和扁平形状的电池也是可行的。目前形成了 BCX 和 CSC 两个系列的商品电池，如表 6.5-3 中所列。

表 6.5-3　含卤素添加剂的氯氧化物电池的型号、尺寸和特性

电池体系		$BrCl-SOCl_2$				$Cl_2-SO_2Cl_2$		
电池型号		AA	C	D	DD	C	D	DD
开路电压（V）		3.9				3.95		
平均工作电压（V）		3.4	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3
标称容量（100h 率·Ah）		2.0	7.0	15.0	30.0	7.0	14.0	30.0
尺寸	高度（mm）	13.7	25.6	33.5	33.5	25.6	33.5	33.5
	体积（mm）	48.9	48.4	59.3	111	48.4	59.3	111
	直径（mm）	7.21	24.9	52.3	98.2	24.9	52.3	98.2
质量（g）		16	55	115	216	52	116	213
最大电流能力（mA）		100	500	1000	3000	1000	2000	4000
质量比能量（Wh/kg）		412	433	456	486	455	404	480
体积比能量（Wh/L）		915	984	1000	1070	956	897	1040
工作温度范围（℃）		−55～72				−32～93		

采用添加剂的锂/氯氧化物电池已成为原电池中输出比能量最高的一种，它可以在宽广的温度范围内工作，并且有优良的贮存寿命。相关产品可以用在一些特殊用途，如用于海洋测试与空间应用，用作存贮器备用电源以及其他通信和电子装备电源等。

4 锂/二氧化锰（Li/MnO_2）电池

锂/二氧化锰（Li/MnO_2）电池是第一个商品化的锂/固体正极体系电池，也是当今应用最广泛的消费型锂原电池。它可以有多种结构形式，包括钱币式、碳包式、卷绕式和方形多电池组合体。同时电池可以设计为低电流、中电流和较高电流应用，在一般可以采购到的商品电池容量范围内，最大容量为 2.5Ah。更大尺寸电池适用于特殊用途，并且也已引入到商品系列中。该电池体系性能十分优异，表现为电池电压高（3V）、取决于设计和应用，电池的质量比能量可大于 230Wh/kg 和体积比能量可大于 535Wh/L、在宽广的温度范围内性能良好、贮存寿命长、既使在较高的温度下也十分稳定以及价格低等。

Li/MnO_2 电池当今正广泛应用于各种用途，诸如长期的存贮器备用电源、安全与防护装置、照相机、许多消费电子与电器以及在军事电子中的应用等。自从它进入市场以来，始终保持了良好的安全记录。

4.1 化学原理

Li/MnO_2 电池采用锂为负极，含有高氯酸锂的碳酸丙烯和 1，2-二甲氧基乙烷混合有机溶剂体系作为电解质和经过专门热处理的活性 MnO_2 作为正极活性物质。

电池的反应是

负极　$xLi \longrightarrow xLi^+ + xe$

正极　$Mn^{\text{Ⅳ}}O_2 + xLi^+ + xe \longrightarrow Li_xMn^{\text{Ⅲ}}O_2$

总反应　$xLi + Mn^{\text{Ⅳ}}O_2 \longrightarrow Li_xMn^{\text{Ⅲ}}O_2$

作为嵌入化合物，锂的嵌入使二氧化锰从四价还原成三价，同时当 Li^+ 进入 MnO_2 晶格时便形成 $Li_xMn^{\text{Ⅲ}}O_2$。

电池总反应的理论电压大约是 3.5V，但一个新电池的典型开路电压值为 3.3V。一般要对新制备出的电池采取预放电，使其开路电压降到较低的值，以减低搁置期间腐蚀的发生。

4.2 电池结构

Li/MnO_2 电化学体系可以按不同的设计和结构来制造，以满足不同用途对小型化、轻型化移动电源的多方面要求。

4.2.1 钱币电池

图 6.5-13 示出一个典型钱币电池的剖面图，二氧化锰片面对着锂圆盘负极，中间用非编织聚丙烯隔膜隔开，隔膜浸满了电解质。电池采用卷边压缩密封。电池壳体用作正极端子，而盖子用作负极端子。

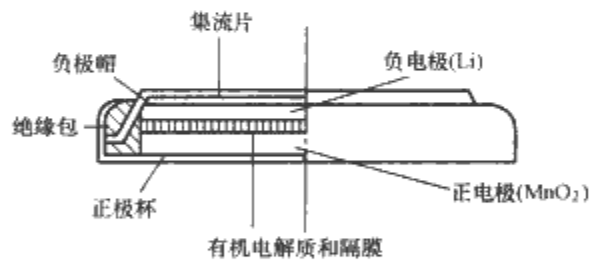


图 6.5-13　钱币型 Li/MnO_2 电池的剖面图

4.2.2 圆柱碳包型电池

碳包型电池是两种圆柱形 Li/MnO_2 电池中的一种，由于采用厚的电极和最大量的活性物质，使电池具有最大的比能量。但是由于限制了电极表面积，从而也限制了电池的放电电流能力，使其只能用于低电流用途。

一个典型电池的剖面图如图 6.5-14 所示，该图示出电池中央是锂负极，环绕在其外面的是二氧化锰正极，两个电极之间由浸满电解质的聚丙烯隔膜隔开。电池盖上有一个安全阀，一旦出现机械或电滥用事件可以释放电池内的压力。除了卷边密封电池外，还可以制成焊接式全密封电池，这些电池具有 10 年贮存寿命，因而可以用于存贮器备用电源和其他低电流用途。

4.2.3 卷绕式 Li/MnO_2 电池

卷绕式电池的结构说明于如图 6.5-15 所示，这种设计专门用于需要提供高脉充电流的应用和连续高电流放电的场合。锂负极和正极（在导电网上的薄型涂膏式电极）与配置在两个电极间的微孔聚丙烯隔膜一起卷绕成“胶卷”状结构。由于采用的电极表面积增大，从而显著提高了电池的放电率能力。

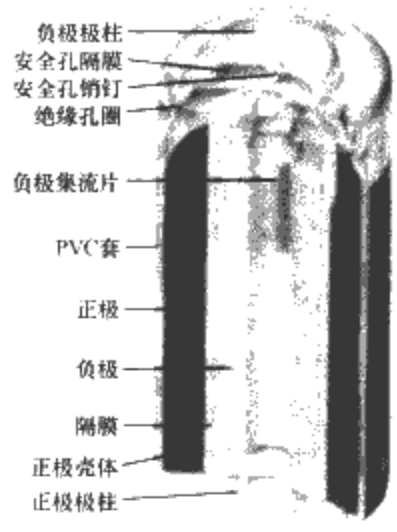


图 6.5-14 碳包型 Li/MnO_2 电池的剖面图

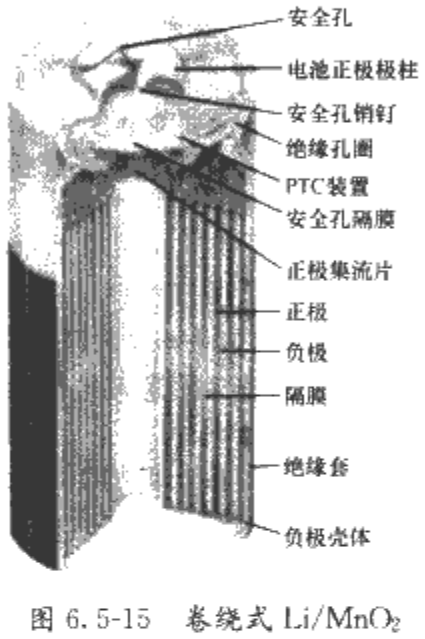


图 6.5-15 卷绕式 Li/MnO_2 电池的剖面图

该结构电池必须设计一个安全阀、一旦电池遇到滥用事件时可释放压力。同事大多这类电池也装有可恢复的正温度系数(PTC)器件，能够限制电流和防止因短路造成的事故发生。

4.2.4 9V 电池组

Li/MnO_2 体系也已经设计成 9V 电池组，其容量为 1200mAh，结构符合 ANSI1604 标准，可以与同尺寸传统锌电池进行互换。该电池组由三个方形单体电池构成，电极设计充分利用了内部空间，如图 6.5-16 所示，电池组外壳采用了一个超声波焊接密封的塑料盒。

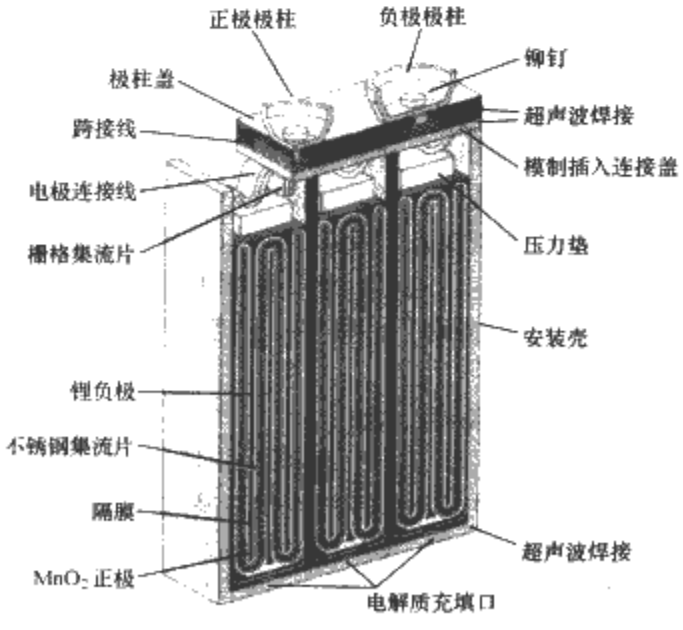


图 6.5-16 9V Li/MnO_2 电池组的剖面图

4.2.5 箔型电池

另一种电池设计概念是采用轻型电池包装，使电池质量和成本减低。其中一种途径是使用热封装薄膜包装的方形电池结构取代金属壳体包装。一个容量为 16Ah 的电池设计说明于图 6.5-17，该电池包含 10 个负极和 11 个正极，以平行方式排列。

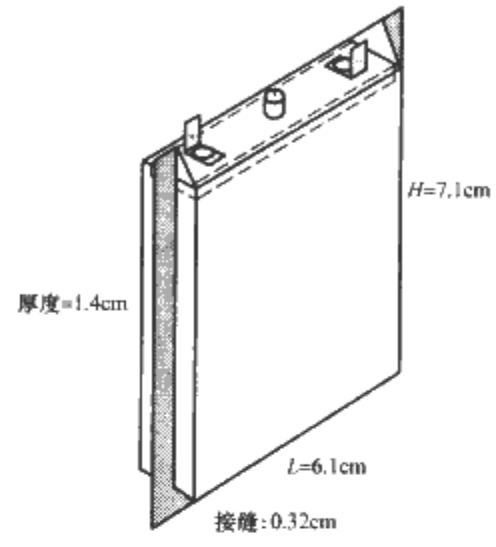


图 6.5-17 箔型电池设计

4.3 工作性能

4.3.1 电池电压

Li/MnO_2 电池在预放电后的开路电压一般为 3.1～3.3V，标称电压为 3.0V。在放电期间，电池的工作电压范围为 3.1～2.0V，具体数值取决于电池设计、荷电状态以及其他放电条件。除了在高电流和低温下放电时的终止电压可以规定较低外，电池大部分容量放出时的终止电压取 2.0V。

4.3.2 钱币型电池的放电特性

钱币型 Li/MnO_2 电池的典型放电曲线示于图 6.5-18 中，可以看出在整个放电过程中，电池以低到中等放电电流放电时的放电曲线相当平稳，直到接近寿命终止时才逐渐降低。这种逐步降低的电压特征可以作为荷电状态指示，表明电池接近了使用寿命的终点。

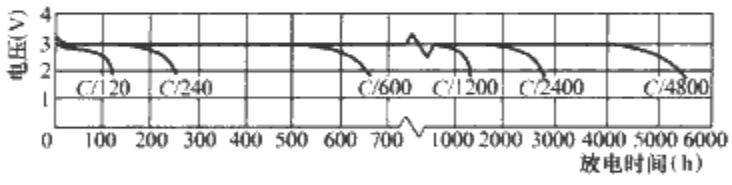


图 6.5-18 钱币型 Li/MnO_2 电池的典型放电曲线

某些应用（例如带光照的发光二极管手表）要求在低的基本电流下，叠加一个高电流脉冲，在这些条件下的电池性能如图 6.5-19 所示。该图说明即使在较高电流下仍然显示好的电压稳定性。

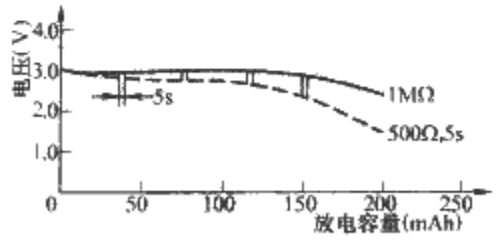


图 6.5-19 在 20℃下，190mAh 钱币 Li/MnO_2 电池的脉冲放电特性

(测试条件：连续负载—1MΩ≈3μA；脉冲负载—500Ω≈5.5mA；脉冲时间—5s；脉冲数—4；脉冲间隔时间—3h)

钱币型 Li/MnO_2 电池能在－20℃～55℃的宽广温度区间内工作，但电池的电压随温度降低而降低，尤其在低温下电池的电压会随电流升高而降至 2V 以下。

4.3.3 圆柱形碳包结构电池的放电特性

圆柱形碳包电极结构电池是设计用于低至中等放电电流应用，在这种放电电流下，它能比同尺寸卷绕电极结构电池输出更高的容量。它在低电流下的放电曲线与钱币电池的放电曲线相似，放电过程的大部分时间内，其放电曲线都十分平坦，只是到接近寿命终止时才逐渐下降。也与钱币电池一样，圆柱碳包结构电池可以在较宽广的温度区间工作，但在低温下仅限于以更低的放电率放电，如图 6.5-20 所示。

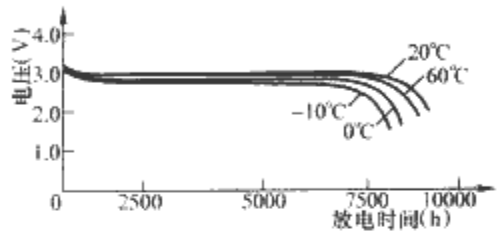


图 6.5-20 圆柱碳包式 Li/MnO_2 电池（850mAh）在不同温度下的放电特性，负载为 30kΩ

4.3.4 圆柱形卷绕结构电池的放电特性

圆柱卷绕结构 Li/MnO_2 电池是设计用于相当高的放电率和在低温下的应用。同样，电池在这些条件下放电时，其放电过程的大部分时间内，放电曲线也都十分平坦，见图 6.5-21。显然，尺寸仅为直径 17mm、高度为 33mm 的卷绕式 Li/MnO_2 电池（CR123A）可以在－20℃～55℃下，以 0.5A 与 1A 连续放电，并获得较好的性能。其中，20℃下，以 0.5A 与 1A 连续放电至 2.0V 时，可分别获得 0.9Ah 和 0.6Ah 容量；而在－20℃下，以 0.5A 连续放电至 2.0V 时还可获得 0.3Ah（若终止电压取 1.8V 时，升至 0.7Ah）容量。

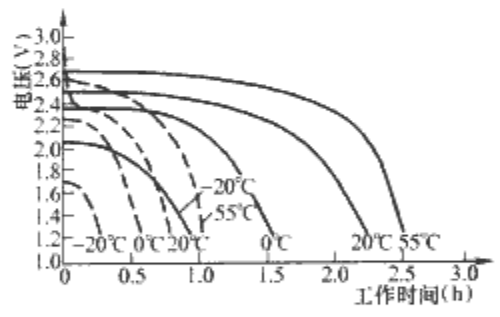


图 6.5-21 卷绕式 Li/MnO_2 电池（CR123A）的典型放电特性，放电电流：虚线 1A；实线 0.5A

图 6.5-22 示出了卷绕式 Li/MnO_2 电池在恒定功率下的放电特性，数据表明，以 800mW 恒功率放电时，电池能输出标称值 4Wh 的能量。此处 800mW 即为 $1/5E$，对应于恒电流放电时的 $1/5C$ 放电率。

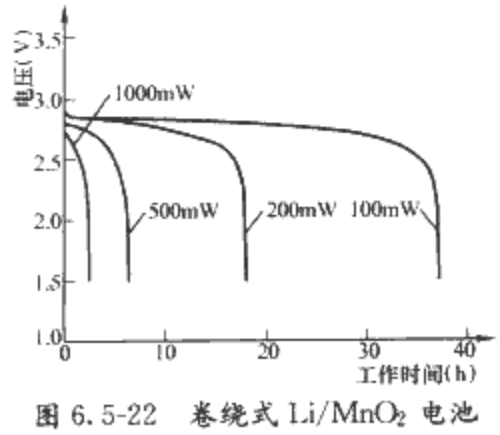


图 6.5-22 卷绕式 Li/MnO_2 电池（CR123A）的典型恒功率放电特性

4.3.5 9V 电池组的放电特性

图 6.5-23 显示出 9V 1.2AhLi/MnO_2 电池组的基本性能，该图显示出电池在 20℃下和温度由－40℃～71℃下的典型放电曲线。显然与传统锌负极电池相比，锂电池具有更高的电压和更长的服务时间，而且低温性能显著提高。

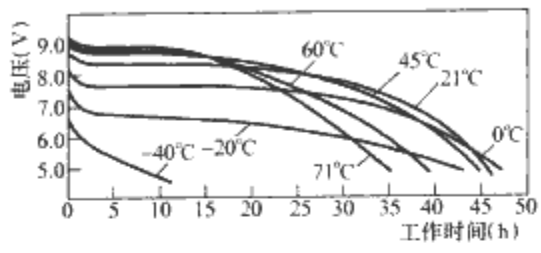


图 6.5-23 9V Li/MnO_2 电池组的放电特性，不同温度下以 300Ω 连续放电

4.3.6 Li/MnO_2 电池的贮存特性

Li/MnO_2 电池的贮存性能十分稳定，贮存期间年容量衰减率低于 1%。贮存后的电池除了在低温和高电流放电外，在通常条件的放电时不会有明显的电压滞后。

4.4 Li/MnO_2 电池的型号、尺寸和特性

目前主要商品 Li/MnO_2 电池的型号、尺寸和特性列入表 6.5-4 中。商品 Li/MnO_2 电池可用于贮存器、手表、计算器、照相机以及无线电频率识别（RFID）器等方面。同时也可用于较高放电电流的马达驱动、玩具、个人数字助手、数码相机等。

一般小容量 Li/MnO_2 电池无任何安全问题，但是如同普通电池那样，应避免充电和焚烧。较大容量的圆柱形电池一般都装有安全阀以防止爆炸，电池组还应加以保护以避免短路和电池反极以及充电和焚烧。

表 6.5-4 商品 Li/MnO_2 电池的型号、尺寸和特性

国际标准（IEC）型号	标称容量（mAh①）	重量（g）	直径（mm）	高度（mm）	体积（cm^3）	比能量②（Wh/kg）	体积比能量（Wh/L）	内阻（1kHz·Ω）
低电流或钱币电池，3V								
CR 1216	25	0.7	12.5	1.6	0.21	100	335	—
CR 1025	30	0.7	10.0	2.5	0.20	125	410	—
CR 1220	35	0.9	12.5	2.0	0.25	110	390	—
CR 1616	55	1.2	16.0	1.6	0.32	128	480	—
CR 2012	55	1.4	20.0	1.2	0.38	110	405	—
CR 1620	70	1.3	16.0	2.0	0.40	150	485	—
CR 2016	75	1.7	20.0	1.6	0.50	125	420	12～18
CR 2320	130	3.0	23.0	2.0	0.83	122	440	—
CR 2025	150	2.5	20.0	2.5	0.79	165	530	12～18
CR 2325	190	3.0	23.0	2.5	1.04	175	510	8～15
CR 2032	210	3.3	20.0	3.2	1.00	175	585	12～18
CR 2330	265	4.0	23.0	3.0	1.35	185	550	—
CR 2430	280	4.0	24.5	3.0	1.41	195	555	8～15
CR 3032	500	7.1	30.0	3.2	2.26	195	600	—
CR 2450	550	6.2	24.5	5.0	2.35	245	650	8～15
CR 2354	560	5.9	23.0	5.4	2.24	205	700	—
CR 2477	1000	10.5	24.5	7.7	3.62	260	770	—

续表

国际标准(IEC)型号	标称容量(mAh①)	重量(g)	直径(mm)	高度(mm)	体积(cm^3)	比能量②(Wh/kg)	体积比能量(Wh/L)	内阻(1kHz·Ω)
圆柱电池，螺旋卷绕结构，3V								
CR 11108③	160	3.3	11.6	10.8	1.14	155	395	3~5
CR 15H270③	750	11.0	15.6	27.0	5.2	190	400	—
CR 17345③	1400	17.0	17.0	34.5	7.8	230	535	2~6
圆柱电池，胶卷结构，3V								
CR 14250	850	9.5	14.5	25.0	11.1	250	580	9~13
CR 17335	1800	17.0	17.0	33.5	7.6	295	660	5~8
电 池 组(mm)								
2CR $\frac{1}{3}$N	160	9.4	13.0(D)×25.2(H)			2CR $\frac{1}{3}$N 单体电池串联，6V		
2CR 5	1300	37.0	17(T)×34(W)×36(H)			2CR 17345 单体电池串联，6V		
CR—P2	1300	37.0	19.5(T)×34(W)×36(H)			2CR 17345 单体电池串联，6V		
1604—LE	1200	34.4	16.8(T)×25.8(W)×48.4(H)			33 个方形单体电池串联，9V		
CR—V6	1500	39.0	29(W)×14.5(T)×52(H)			2"AA"—单体电池串联，6V		
CR—V3	3000	34.0	29(W)×14.5(T)×52(H)			2"AA"单体电池并联，3V		

①低电流电池电流为 $C/200$；高倍率圆柱电池电流为 $C/30$。

②平均电压 2.8V。

③CR 11108=CR+N；CR 15H270=CR 2；CR 17345=CR 123A 出自生产商数据手册。

5 锂/氟化碳 [Li/(CF)$_n$] 电池

锂—氟化碳 [Li/(CF)$_n$]电池也是首先作为商品的一种固体正极锂电池。由于其理论质量比能量(大约 2180Wh/kg)是固体正极系列中最高的，因此它受到了极大地关注。它的开路电压为 3.2V，工作电压为 2.5～2.7V。在小型电池中，它的实际比能量为 250Wh/kg 和 635Wh/L；在大型电池中，它的实际的比能量为 590Wh/kg 和 1050Wh/L。该电池以低到中放电率放电的应用为主。

5.1 化学原理

该电池以锂作为负极，以固体聚一氟化碳[(CF)$_n$]作为正极。一氟化碳是碳粉和氟气反应所形成的夹层化合物，它虽然在电化学上是活性的，但其化学稳定性却很高，温度高达 400℃时也不会热分解，因而具有长的贮存寿命。该电池可以使用多种不同的电解质，有代表性的电解质是碳酸丙烯(PC)与 1,2-二甲氧基乙烷(DME)的混合溶剂再加入四氟硼酸锂($LiBF_4$)溶质。电池的简化放电反应为

负极反应 $nLi \longrightarrow nLi^+ + ne$

正极反应 $(CF)_n + ne \longrightarrow nC + nF^-$

总反应 $nLi + (CF)_n \longrightarrow nLiF + nC$

显然当放电进行时，聚一氟化碳转变成导电的碳，从而增加电极的导是率，提高了放电电压的平稳性和电池的放电效率。与 Li/MnO_2 电池相比这是其优势之处。

5.2 电池结构

Li/(CF)$_n$ 电池可制成各种型号和结构，容量范围从 20mAh 至 25Ah 的钱币式电池、针杆式电池到圆柱形和方形结构的电池。较大型号的电池也已得到发展，并用于特殊用途中。其各种结构皆与 Li/MnO_2 电池类似，可参见 5.4 节中的相关介绍。

5.3 工作性能

与 Li/MnO_2 电池相比，Li/(CF)$_n$ 电池的放电曲线更为平坦，如图 6.5-24 和 6.5-25 所示。在一些情况下，会观察到 Li/(CF)$_n$ 电池放电的起始电压低于负载要求的工作电压，然后随着放电进行而逐步恢复。这一现象乃由于 (CF)$_n$ 是绝缘体，在放电过程中一旦生成导电性碳时，正极的电阻便减小，工作电压随之升高。由此也使该电池在低放电率下的库仑利用率接近 100%。

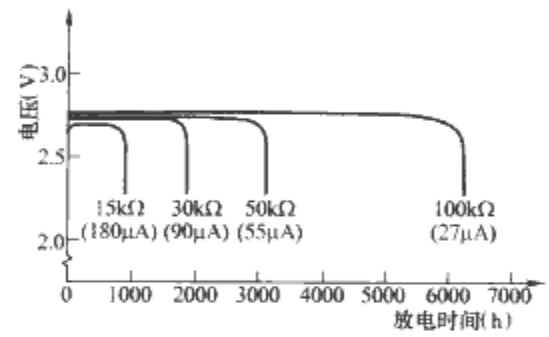


图 6.5-24 20℃下钱币 Li/(CF)$_n$ 电池的典型放电曲线，电池容量：165mAh

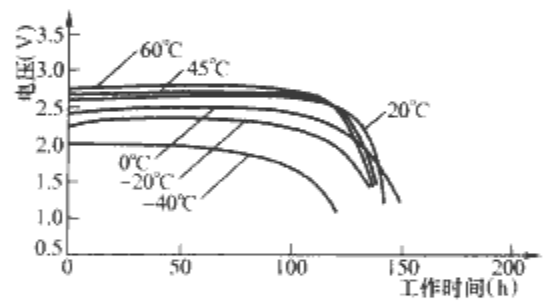


图 6.5-25 20℃下圆柱型 Li/(CF)$_n$ 电池的典型放电曲线，BR2/3A：1.2Ah、放电负载：300Ω

5.4 锂/一氟化碳 [Li/(CF)$_n$] 电池的型号、尺寸与特性

Li/(CF)n 电池体系已经形成了钱币式、圆柱形商品系列，它们可以合同尺寸的 Li/MnO_2 电池进行任意互换使用。主要商品 Li/(CF)$_n$ 电池的型号、尺寸与特性列入表 6.5-5 和表 6.5-6 中。其中表 6.5-5 中还列出了一类耐高温电池产品，它们适用于在－40℃～150℃的应用，具有长的贮存寿命和长期平稳的放电性能，使其可用来设计成在印刷电路板上安装的钱币电池，作为低电流下长期使用或备用。Li/(CF)$_n$电池这种耐高温的特点是 Li/MnO_2 电池所不具备的。

表 6.5-5 商品 Li/(CF)$_n$ 电池的型号、尺寸与特性

电池型号	IEC	标称容量(mAh)	脉充电流(mA)	推荐电流		尺寸		
				标准值(mA)	最低值(μA)	直径(mm)	高度(mm)	质量(g)
钱币电池，3V								
BR1216	—	25	5	0.03	1	12.5	1.60	0.6
BR1220	—	35	5	0.03	1	12.5	2.00	0.7
BR1225	BR1225	48	5	0.03	1	12.5	2.50	0.8

续表

钮币电池，3V

电池型号	IEC	标称容量（mAh）	脉充电流（mA）	推荐电流		尺寸		
				标准值（mA）	最低值（μA）	直径（mm）	高度（mm）	质量（g）
BR1616	—	48	8	0.03	1	16.0	1.60	1.0
BR1232	—	120	8	0.03	1	16.0	3.20	1.5
BR2016	BR2016	75	10	0.03	1	20.0	1.60	1.5
BR2020	BR2020	100	10	0.03	2	20.0	2.00	2.0
BR2032	—	190	10	0.03	4	20.0	3.20	2.5
BR2320	BR2320	110	10	0.03	2	23.0	2.0	2.5
BR2325	BR2325	165	10	0.03	3	23.0	2.50	3.2
BR2330	—	255	10	0.03	5	23.0	3.00	3.2
BR3032	BR3032	500	10	0.03	10	30.0	3.20	5.5

钮币电池，高温工作，3V

电池型号	尺寸（mm）		标称容量（mAh）	温度范围（℃）
	直径	高度		
BR1225A	12.5	2.50	48	−40～+150
BR1632A	16.0	3.20	120	−40～+150
BR2330A	23.0	3.00	255	−40～+150
BR2447A	24.5	7.0	1000	−40～+120

表 6.5-6 商品 Li/$(CF)_n$ 电池的型号、尺寸与特性

针杆式电池，3V

电池型号	标称容量①（mAh）	推荐电流		尺寸		质量（g）	工作温度范围（℃）
		脉冲（mA）	标准（mA）	直径（mm）	高度（mm）		
BR425	25	4	0.5	4.2	25.9	0.55	−20～+60
BR435	50	6	1	4.2	35.9	0.85	−20～+60

圆柱形电池，3V

电池型号	电性能（20℃）				尺寸(最大值)		质量（g）
	标称容量②（mAh）	标准电流（mA）	连续最大电流（mA）	最大脉冲电流（mA）	直径（mm）	近似高度（mm）	
BR—C	5000	150	300	1000	26.0	50.5	42.0
BR—A	1800	2.5	250	1000	17.0	45.5	18.0
BR—2/3A	1200	2.5	250	1000	17.0	33.5	13.5
BR—AH③	2000	2.5	250	1000	17.0	45.5	18.0
BR—AG③	2200	2.5	250	1000	17.0	45.5	18.0
BR—2/3AH③	1350	2.5	250	1000	17.0	33.5	13.5
BR—2/3AG③	1450	2.5	250	1000	17.0	33.5	13.5

①此处的标称容量系在标准电流下获得。

②此处的标称容量系在20℃下，采用标准电流和终止电压2.0V时获得。

③H和G代表更高容量型。

6 锂/二硫化铁（Li/FeS_2）电池

硫化铁体系中有一硫化铁（FeS）和二硫化铁（FeS_2）两种形式，都可用于固体正极的锂电池，其中二硫化铁体系显示出较高的硫含量和较高电压，从而已经首先实现了商品化。电池的标称电压为1.5V，因此可以直接代替具有相同电压的水溶液电解质电池。锂/硫化铁电池曾经制成扣式电池，用于替代相同尺寸的锌/氧化银（Zn/Ag_2O）电池，但现在已退出了市场。

锂/硫化铁电池现在制成圆柱形结构，他们具有比碱性锌/二氧化锰电池更好的高电流放电能力和低温性能，因此已经成为超市中的商品，可以用于取代同尺寸的锌负极电池。

6.1 化学原理

Li/FeS_2 电池采用锂为负极、硫化铁为正极和碘化锂在有机混合溶剂的溶液作为电解质，电池反应为

负极 $4Li \longrightarrow 4Li^+ + 4e$

正极 $FeS_2 + 4e \longrightarrow Fe + 2S^{2-}$

总反应 $4Li + FeS_2 \longrightarrow Fe + 2Li_2S$

电池反应过程中有中间产物形成，但过程尚未搞清楚。Li/FeS_2 电池以小电流放电时，其阶梯形的放电曲线可以作为中间产物存在的证据。

6.2 电池结构

Li/FeS_2 电池可以制成各种不同的结构，包括扣式电池、碳包式与卷绕式电极的圆柱形电池，其中碳包式结构最适合低电流放电，而卷绕式电极结构对高放电率应用是必需的，并且正是这种电池结构实现了规模生产和商品化。

卷绕式电极圆柱形电池的结构如图6.5-26所示，这种电池设计中一般同时采用了多种安全装置，以便对诸如短路、充电、强迫放电或过热等滥用条件提供保护。在图中表示出两种安全装置，一种是压力阀，用于释放过大的内部压力，以防止电池受热时或电滥用时的猛烈破裂。另一种是可恢复的热开关，称之为正温度系数（PTC）器件。

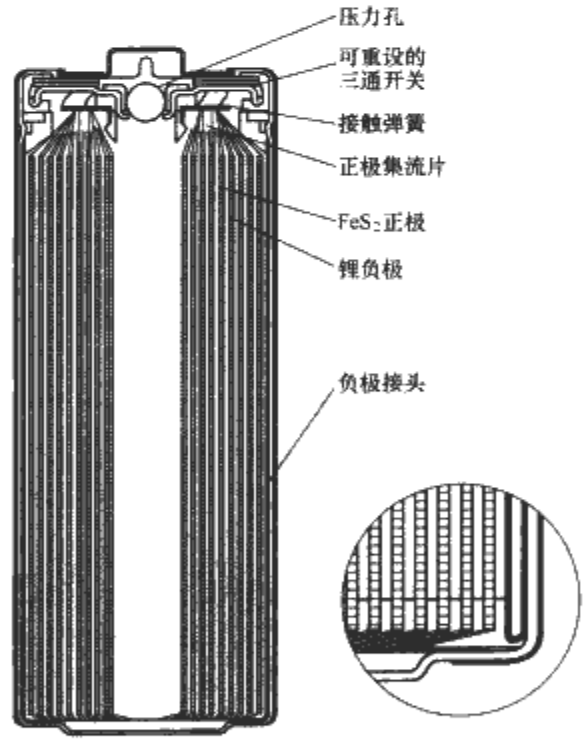


图6.5-26 AA型 Li/FeS_2 电池的剖面及其顶部装配图

PTC的主要目的是对外部短路或在某些其他电滥用条件下起到保护作用，即当电池温度达到PTC设计的活化温度时，其电阻值猛然增加，致使相应流过的电流降低，从而降低热量的产生。此后当电池（包括PTC）冷却下来，PTC电阻则下降，可以允许电池再进行放电。

6.3 工作性能

Li/FeS_2 体系的标称电压表示为1.5V，而未放电电池

的开路电压近似 1.8V，一旦接入负载，电压可在几毫秒内降低。

与 1.5V 水溶液碱性锌/二氧化锰电池相比，Li/FeS_2 电池典型地显示出更高的工作电压和更平坦的放电曲线，如图 6.5-27 所示。在该图上对电池体系在相对低与高放电率的恒电流下的性能做了比较，显然 Li/FeS_2 电池显示出高的比能量与较高输出功率，特别是在较高放电率下的工作电压差别最大。

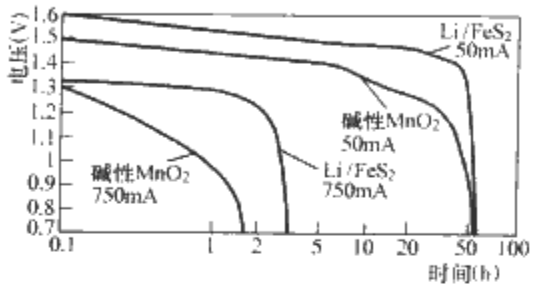


图 6.5-27 21℃下，AA 型 Li/FeS_2 电池和碱性 Zn/MnO_2 电池的性能比较

Li/FeS_2 电池也适合于在宽广的温度区间内工作，一般为−40℃～60℃。如同在室温下一样，其在高温下的工作寿命也得到提高。虽然 Li/FeS_2 电池受到低温的影响远小低于水溶液电解质电池，但当放电温度低于室温时，电池工作寿命也要明显降低。

6.4 电池型号与应用

目前生产的商品电池只有 AA 型圆柱 Li/FeS_2 电池，并作为消费产品进入超级市场供选购，它可以任意取代用电装置中的同型号传统锌负极电池。该产品的实际容量与放电率以及工作温度有关，常温下以 0.3mA 放电的容量为 2.4Ah、30mA 和 100mA 放电都可达 2.6Ah，而 1000mA 放电则可升至 2.8Ah。可以看出他倾向应用于有高电流要求的用途，如照相机、计算机及其他移动电子装置。与 AA 碱性锌/二氧化锰电池相比，AA 性 Li/FeS_2 电池在照相机闪光灯的应用中，显示出在更快的循环时间内（3～6s 内），可以提供更多的闪光次数（近 800～1000 次，而碱性锌/二氧化锰电池的循环时间一般 6～9s，且闪光次数只有 600～800 次）。

7 固体电解质锂原电池

与液体电解质电池不同，固体电解质电池是采用固体状态具有离子导电性的材料为电解质，由此这种电池也称谓全固态电池（All Solid Battery）。与含液体组分的电池相比，全固态电池的优越性在于其高的热稳定性、低的自放电率、宽广的环境条件适应能力（温度、压力和加速度）以及高的比能量（300～700Wh/L）。另外，全固态电池也受到一定限制，其中主要是由于大部分固体电解质在常温时导电率非常低，所以只能以极低的功率输出（微瓦级）。

目前已商品化的固体电解质原电池只有固体电解质锂/碘电池，即 $Li/LiI/I_2$（P2VP）电池，其中固体 LiI 是锂离子导体，37℃下导电率为 $(0.2\sim0.8)\times10^{-6}\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$。这种电池已经成功用作体内植入式心脏起搏器的电源近二十余年，而且目前已成为心脏起搏器的唯一采用电源。由于其自放电很低，可保证在起搏器工作中的使用寿命长达 7～10 年，甚至更长。

7.1 锂/碘固体电解质电池

7.1.1 工作原理

锂/碘固体电解质放电时按下列方程式反应

$$Li+1/2I_2 \longrightarrow LiI$$

由于正极采用聚-2-乙烯基吡啶络合碘（$P2VP\cdot nI_2$），电池中的反应可直接表示为

负极反应 $2Li \longrightarrow 2Li^+ + 2e$

正极反应 $2Li^+ + 2e + P2VP\cdot nI_2 \longrightarrow P2VP\cdot(n-1)I_2 + 2LiI$

总的电池反应 $2Li + P2VP\cdot nI_2 \longrightarrow P2VP\cdot(n-1)I_2 + 2LiI$

锂和碘消失的同时，它们的反应产物碘化锂（LiI）便在两种反应物间的区域沉积。LiI 不仅是电池的反应产物，而且还用作电池隔膜和固体电解质。这种电池的理论比能量为 1900Wh/L，以 $1\sim2\mu A/cm^2$ 的放电率放电时，可以获得接近 1000Wh/L 的实际数值。在放电过程中，碘化锂层变得越来越厚，由此随着放电产物的增长，电池的电阻也增大。

7.1.2 电池结构

目前已生产了多种结构类型的 Li/I_2 电池，但基本分为中性外壳和外壳带电两类。其中 20 世纪 80 年代推出的第一种款式电池采用外壳为中性设计，如图 6.5-28 所示。其外壳为不锈钢，其内壁衬有塑料绝缘体。锂（负极）形成的一个封装袋紧贴于塑料内，袋内用于填充 I_2（P2VP）去极化剂。正极集流体放置在电池中央，从正极和负极引出的集流体，穿过壳上的密封绝缘子。将熔融的碘去极剂灌进锂封装袋内，待正极材料固化后，封住锂封装袋上部，再加入一个塑料杯使电池得以完成装配。该电池结构中，消除了外壳与碘去极剂的任何接触。

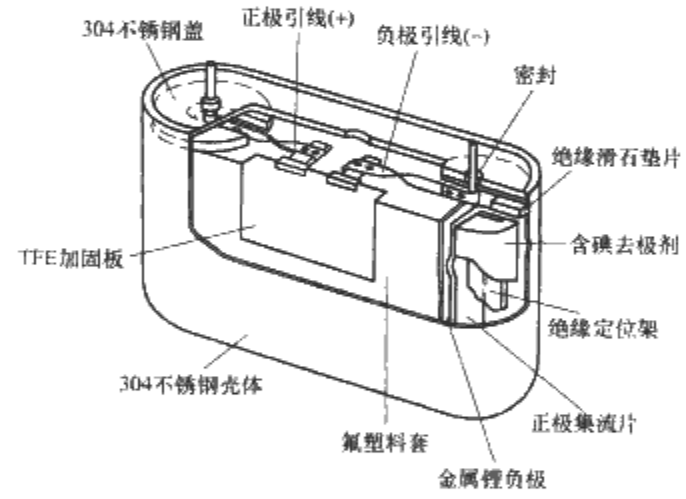


图 6.5-28 802/35 型 Li/I_2 电池图

在第二种结构的电池中，采用类似尺寸的外壳为正极的设计，该电池的截面图如图 6.5-29 所示。该电池的制造方法与图 6.5-28 中的电池制造方法稍微不同，电池中央为锂负极，用不锈钢壳作为电池的正极集流体。大多数型式的电池都是在正极加入到电池之前，先将电池盖子和壳焊接在一起，实现电池的完整装配。最后通过一个很小的注液口将热

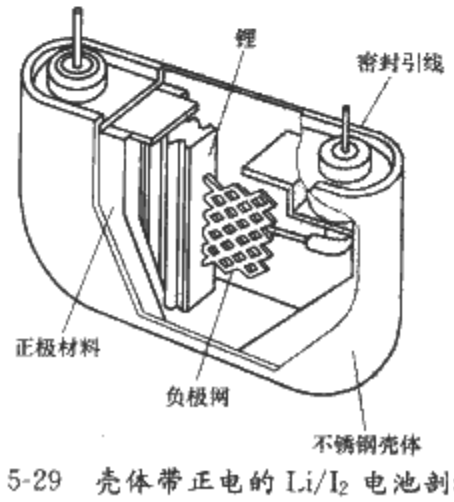


图 6.5-29 壳体带正电的 Li/I_2 电池剖视图

的去极剂注入电池壳内，然后将注液口焊接封闭。负极集流体通过玻璃金属密封绝缘子引出。

7.1.3 放电特性

Li/I_2 电池的开路电压接近 2.8V，该数值在电池的整个使用寿命过程中保持不变。放电产物碘化锂的电阻控制了大部分放电期间的工作电压。只有在放电结束时，碘去极剂的电阻才在电池整个内阻中占重要位置。因为电池的内阻十分高，并在整个工作寿命过程中增大，因此放电曲线是不平坦的，甚至当电池以中等的电流放电时也是如此。图 6.5-30 是一个类似 D 形状的电池在 25℃下的实测和预测的放电曲线。该电池以 2 个月（5mA）放电率放电，电池输出了 7Ah（0.45Wh/cm³），进一步降低放电率时的容量和比能量预期要增大。以 1mA 和 2mA 放电率放电的设计预测曲线也示予图中，实际上在心脏起搏器中的平均放电电流会更低。

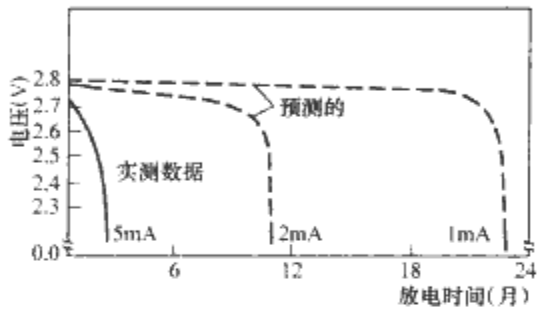


图 6.5-30 类似 D 形状的 Li/I_2 电池在 25℃下典型的实测和预测的放电曲线

7.1.4 典型的起搏器 Li/I_2 电池型号、尺寸和基本特性

表 6.5-7 列出了典型的起搏器 Li/I_2 电池型号、尺寸和基本特性。这一系列医疗用电池相对地昂贵，因为生产量很小，而可靠性要求极高。

表 6.5-7 Li/I_2 起搏器电池的厂家规范

型号	制造商的标称容量（Ah）	质量（g）	体积（cm³）	尺寸（长×宽×高，mm）	体积比能量（Wh/cm³）	质量比能量（Wh/g）
9107	0.43	5.3	1.40	30×4.2×13	0.81	0.22
9114	0.56	7.0	1.82	28×6×14	0.82	0.21
9331	0.82	9.1	2.34	32×5×19	0.93	0.24
8711	0.86	9.5	2.52	27×5×22	0.90	0.24
8831	0.89	10.7	2.75	43×5×16	0.86	0.22
9412	0.92	10.2	2.20	32×5×21	1.11	0.24
9085	0.98	10.9	2.93	27×5×25	0.89	0.24
9438	0.98	10.7	2.93	27×5×25	0.89	0.24
9105	0.99	10.6	2.95	27×6×21	0.89	0.25
9236	1.00	11.0	2.85	24×6×25	0.93	0.24
8426	1.07	11.6	3.02	33×5×23	0.94	0.24
9074	1.15	12.9	3.28	43×5×18	0.93	0.24
8708	1.21	13.4	3.52	47×5×22	0.91	0.24
8431	1.28	13.8	3.67	27×5×31	0.92	0.25
8402	1.29	14.4	3.72	45×5×22	0.92	0.24
8843	1.36	13.6	3.73	32×6×23	0.97	0.27
8207	1.55	17.2	4.70	27×7.8×25	0.87	0.24
8950	1.58	15.9	4.45	27×6×31	0.94	0.26
8077	1.78	18.9	5.11	45×7×22	0.92	0.25
8206	1.98	20.4	5.54	27×7.8×31	0.95	0.26
8041	2.10	22.0	5.81	33×8.6×26	0.96	0.25
9111	2.36	22.8	6.24	33×7×31	1.00	0.27

7.2 Li/LiI（Al_2O_3）/金属盐固态电池

采用分散相 LiI 和 Al_2O_3 为电解质的锂原电池是一个真正的全固态电池体系，由于碘化锂中分散了数量相当多（约 50m/o）的高表面积的氧化铝，碘化锂的导是率可以提高几个数量级，25℃下可高达 $10^{-4}\Omega^{-1}cm^{-1}$。表 6.5-8 列出了集中使用化的 $Li/LiI(Al_2O_3)$/金属盐固态电池，可以看出电池中的所有组分都是固体，没有明显的液体量或蒸汽组分共存。电池在 20 世纪 80 年代就已经实现了商品化，但以后却退出了市场。

其中商品化 Li/LiI/Pb，PbS 电池为全密封扣式电池结构，其中单体电池直径为 29mm、高度 2.5mm、电压 1.9V、容量 350mAh；而双电堆组合电池为 3.8V、350mAh。

表 6.5-8 实用固体电解质锂原电池体系

电池体系	实际体积比能量（Wh/cm³）	电池反应	E^0（V）
$Li/LiI(Al_2O_3)/PbI_2$、Pb	0.1~0.2	$2Li+PbI_2 \longrightarrow 2LiI+Pb$	1.9
$Li/LiI(Al_2O_3)/PbI_2$,PbS,Pb	0.3~0.6	$2Li+PbI_2 \longrightarrow 2LiI+Pb$	1.9
		$2Li+PbS \longrightarrow Li_2S+Pb$	1.8
$Li/LiI(Al_2O_3)/TiS_2$，S	0.9~1.0	$2Li+TiS_2 \longrightarrow LixTiS_2$	2.5~1.9
		$2Li+S \longrightarrow Li_2S$	2.3

第 6 章 贮 备 电 池

1 贮备电池

1.1 贮备电池的基本特点

贮备电池是在使用前处于惰性状态，一旦使用时，可通过特定方式将其激活进入工作状态的电池。亦称激活电池。事实上贮备电池也属于一次电池范畴，而且一旦激活，必须立即使用，并在放电至终止电压后即废弃；同时，一般激活后的电池不使用也会因自放电而耗尽能量。

由于这类电池平时贮存时电池内没有发生电化学反应的条件，检测不到电池的电压，而且电池正负极柱之间的电阻一般为无穷大。因此这类电池的共同特点是贮存寿命长(5～15 年)、平时无需维护、使用灵活与方便。同时这类电池的电化学体系大多能输出较高功率，并具有较宽广的工作温度范围（−50℃～+70℃）和耐冲击、振动等，因此特别适合作应急电源、如海上救生无线电系统及信号电源等以及各种军事武器装备电源，如作各种导弹、炮弹电源以及作电动鱼雷和诱饵鱼雷的动力电源等。

1.2 贮备电池的分类与应用

贮备电池可以分为液体激活贮备电池和热激活电池两大类：

(1) 液体激活贮备电池。液体激活贮备电池是正、负极组成的电池本体和电解质（液）分开贮存的电池。这种电池又可分为电解质或溶剂贮存在电池系统外的贮备电池，又称为水激活式贮备电池和电池体系本身带电解质贮液器的贮备电池两类。使用时，只要将电解质从外部或内部的贮液器注入到电池本体即可工作。

1) 水激活式贮备电池。一般设计有进液口（有的还有出液口），电池的工作模式是当使用时，通过打开电池本体上的进液口（或注液口），使海水或淡水流入（或注入），将电池激活进入工作状态。这种电池一般以海水直接作电解质或使用海水或淡水溶解贮备在电池本体中的固体碱、盐作电解质。镁/氯化银（Mg/AgCl）一次海水或淡水激活镁/氯化亚铜（Mg/CuCl）一次海水或淡水激活电池，铝/氧化银（Al/AgO）海水激活主动循环电池等属于该类电池。小型水激活电池主要用作海上声纳浮标与救生电源等，大型水激活电池主要用作电动鱼雷动力电源。

2) 带电解质贮液器的贮备电池。一般设计有专门的贮液器，它单独贮存电池工作所必须的电解质溶液。这种电池的工作模式是当使用时，将电解质从贮液器注入到电池本体即可工作。按照不同的使用要求和设计方案，可将贮液器设计为筒式、泡囊式、气囊式、蛇管式、安瓿式和活塞式等不同结构形式。常见的电池有一次自动激活锌氧化银电池(Zn/KOH/AgO 或 Zn/KOH/Ag_2O)；一次自动激活铅酸电池（Pb/H_2SiF_6 或 Pb/$HClO_4$)；一次自动激活安瓿式电池，如安瓿式铅硼氟酸电池（HBF_4/PbO_2)、安瓿式锂/亚硫酰氯电池（Li/$SOCl_2$）和安瓿式锂/五氧化二钒电池（Li/V_2O_5）等；一次自动激活锂电池，如一次自动激活锂/亚硫酰氯（Li/$SOCl_2$）和锂/二氧化硫（Li/SO_2）电池等。小型安瓿式贮备电池主要用于炮弹引信电源；中等尺寸贮备电池主要用作卫星、导弹与核武器电源；而超大功率 Zn/KOH/AgO 自动激活电池主要用作电动鱼雷的动力电源等。

(2) 热激活电池。热激活电池又称熔融盐电化学体系贮备电池，采用常温下不导电的固态多元共熔体盐类作电解质的电池。使用时，利用外部提供的电能或机械能将电池内部的加热系统引燃，瞬间可使常温下不导电的固体状态多元共熔体盐类熔融呈离子型导体电解质，即进入工作状态。在热电池中常用的典型二元共熔体盐为 45%LiCl-55%KCl，熔点为 352℃；典型的三元共熔体盐为 LiCl-LiBr-LiF，熔点为 430℃。热电池按负极材料可分为镁阳极系列、钙阳极系列和锂合金阳极系列三大类热电池。目前主要应用的有钙/硫酸铅、钙/铬酸钙、镁/五氧化二钒、锂铝（或锂硅）/二硫化铁（或二硫化钴）等电化学体系。热电池中的点火头一旦接受到脉冲能量冲击（电或机械的），可瞬间发火引燃引流条、并迅速引燃每个电对中的加热片，从而使每个电对中的电解质熔融，电池便进入工作状态。

从上述中可以看出，大多贮备电池体系主要都是针对军事应用发展起来的，其中一些产品还只能用于导弹、鱼雷和其他武器系统，不能转化为民用产品。为此本章以下部分将首先重点对那些也可用于民用系统的贮备电池体系作较详细的介绍。

2 水激活电池

水激活电池是指用淡水或海水激活的贮备电池，电池为不含水的干态贮存，使用时将起电解液或溶剂或正极活性物质作用的淡水或海水引入电池激活放电。以海水为电解液的电池有镁/氯化银、镁/氯化亚铜、镁/氯化铅、镁/碘化亚铜、镁/硫化氰酸亚铜、铝/空气电池等。他们都具有贮存寿命长、低温性能较好、比能量（有些应用中可以不计水的重量）等特点。水激活电池结构大致分为四种：浸没型、湿润型、自流型、控流型。浸没型主要用于水下声纳、浮标、航标灯等方面。湿润型主要用于应急灯、探空气象装置等。自流型、控流型主要应用于鱼雷动力源领域。

2.1 镁/氯化银贮备电池

由于氯化银具有类似氧化银的特点，放电过程可以产生高导电性金属银，使这类电池具有平稳的放电电压、高的放电率能力和电极活性物质利用率。由此也使镁/氯化银贮备电池体系显示出比能量较高、放电率较高的优势，它曾被设计为可以为小型电动鱼雷提供动力的高功率电源。但是它的最大劣势却是成本特别高，因此在许多一般应用中，逐渐由低成本的镁/氯化亚铜贮备电池所替代。

镁/氯化银电池的化学原理如下

负极反应 $Mg-2e\longrightarrow Mg^{2+}$

正极反应 $2AgCl+2e\longrightarrow 2Ag+2Cl^-$

电池总反应 $Mg+2AgCl \longrightarrow MgCl_2+2Ag$

图6.6-1显示了目前生产的两种小型镁/氯化银电池。这些电池被应用于以下几种用途：商业航线上的救生艇急救装置、声纳浮标、无线电和照明灯信标、水下武器、无线电探空仪装置。

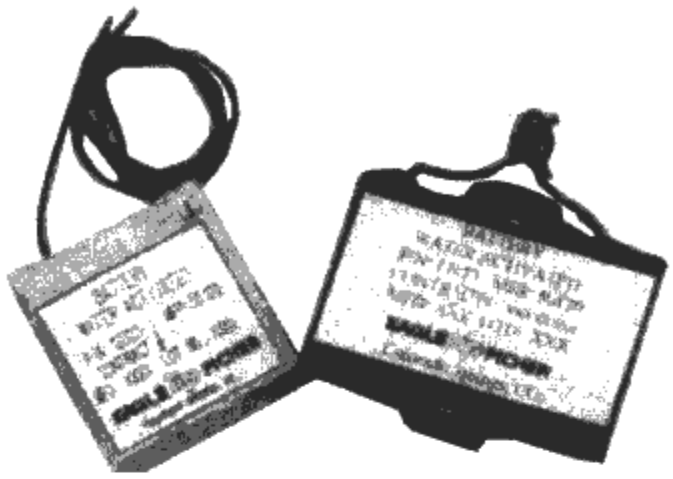


图6.6-1 典型小型镁/氯化银电池

2.2 镁/氯化亚铜贮备电池

镁/氯化亚铜贮备电池体系从1949年逐渐实现商业化，与镁/氯化银电池体系相比，其体积比能量低、放电率低和高湿环境贮存寿命短。但是它的最大优势却是成本特别低。它主要应用于探空气象设备中，在这项用途上无需使用昂贵的氯化银体系。近来，它又被用于航空和海上救生衣照明电源。

镁/氯化亚铜的化学原理如下

负极反应 $Mg-2e \longrightarrow Mg^{2+}$

正极反应 $2CuCl+2e \longrightarrow 2Cu+2Cl^-$

电池总反应 $Mg+2CuCl \longrightarrow MgCl_2+2Cu$

图6.6-2上图是一只典型的镁/氯化亚铜贮备电池，它采用了堆式电极结构。该电池通过充入水激活，在1～10min内电池达到满电压。电池在室温条件下激活后，最适合于在温度－50℃～60℃之间，大约1～3h率放电，其典型的放电曲线如图6.6-2中的下图所示。显然当电池在低温下工作时，放电过程中产生的热量有助于电池工作。因此，降低温度对能量输出只产生很小的变化。在大电流放电下有可能发生过热和干涸，同时自放电将缩短激活后的寿命。为了达到最佳效果，这些电池应在激活后不久即投入使用。

镁/氯化亚铜水激活电池体系目前正应用于救生衣照明电源。图6.6-3是一只典型的照明灯，而表6.6-1列出了使用电池的型号、尺寸和特性。

表6.6-1 救生衣照明灯电池的型号、尺寸和特性

电源型号	额定电压(V)	额定尺寸(cm)			额定放电容量		
		长度	宽度	高度	时间	Wh	正常使用方式
WAB—H12	1.7	2.9	1.6	9.3	12h	4.4	空军/海军救生衣照明灯
WAB—H18	1.7	2.9	1.6	9.3	8h+	3.3	空军救生衣照明灯
WAB—MX8	3.6	3.1	3.3	9.5	8h+	10.7	海军救生衣照明灯

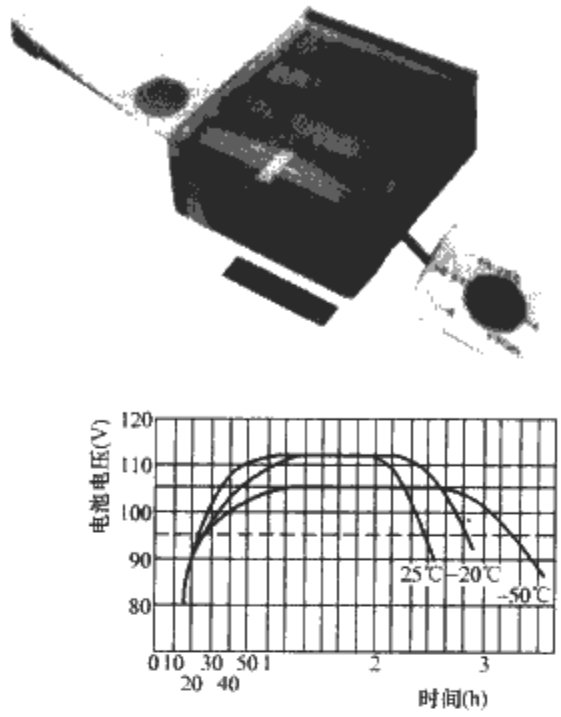


图6.6-2 无线电探空仪用镁/氯化亚铜电池（上图）及其典型放电性能（下图）

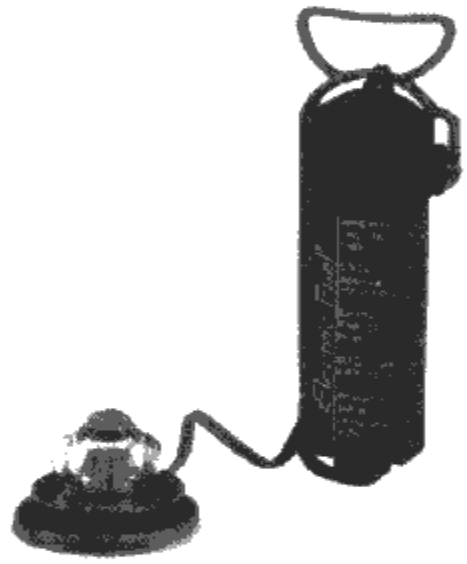


图6.6-3 典型救生衣照明灯系统

3 电解质激活电池

3.1 自动激活锌/氧化银贮备电池

电池正负电极的构成和反应原理与充电态锌/氧化银蓄电池相同。电池是一次使用，贮存期一般为5～8年。电池由电池组、贮液器、自动注液装置构成一个整体，见示意图6.6-4。激活时通过自动注液装置，在短时间内快速地将电解液注入电池中并立即建立电压给负载供电。电池中贮液器的结构形式有集中泡囊式、分离泡囊式、蛇管式等，它与气体发生器构成一个电池的自动激活（注电液）系统。电池组有隔离电池槽串联式和双极性电对叠摞串联电堆式。自动激活电池的性能特点是：维护简单，机动性强，能快速激活。贮存寿命长（8年以上）。因使用要求不同，激活时间有十分之几秒到几秒不等。激活后的湿寿命期，有几十分钟至数小时的可预检型，但多数是激活后必须立即使用的不可预检型。电池组设计有电控加热系统或化学加热系统，可使电池迅速达到工作温度，以满足低温使用下的工作性能要求。由此电池可在－40℃～50℃工作，主要用在战略和战术导弹、核武器、鱼雷等现代武器上的主控和动力电源。

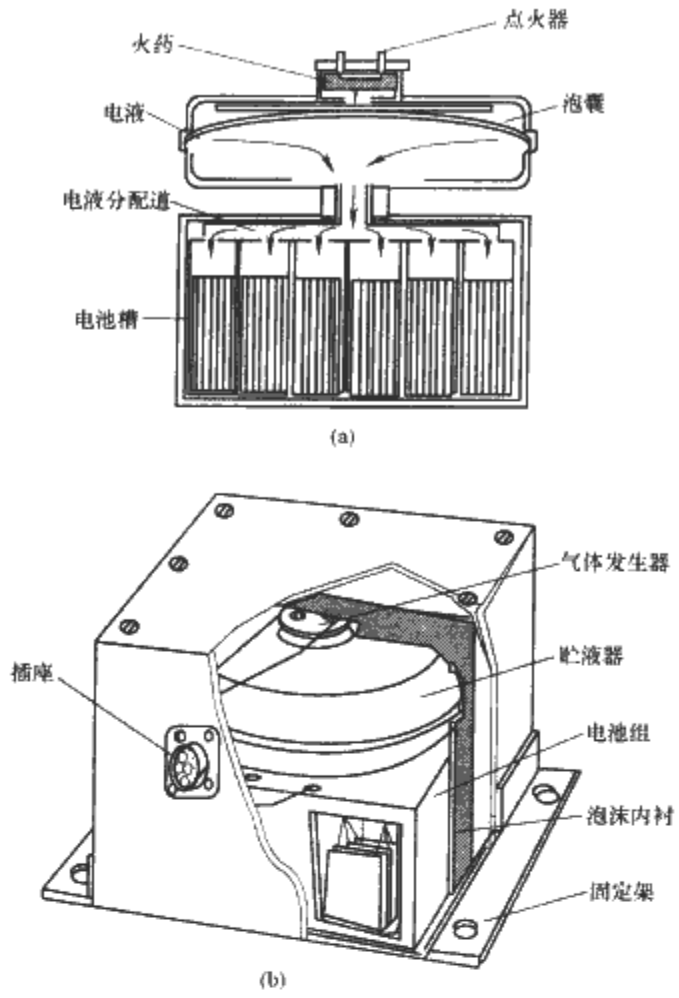


图 6.6-4 集中泡囊贮液式自动激活电池激活原理及结构示意图
(a) 电池注液示意图；(b) 电池组结构

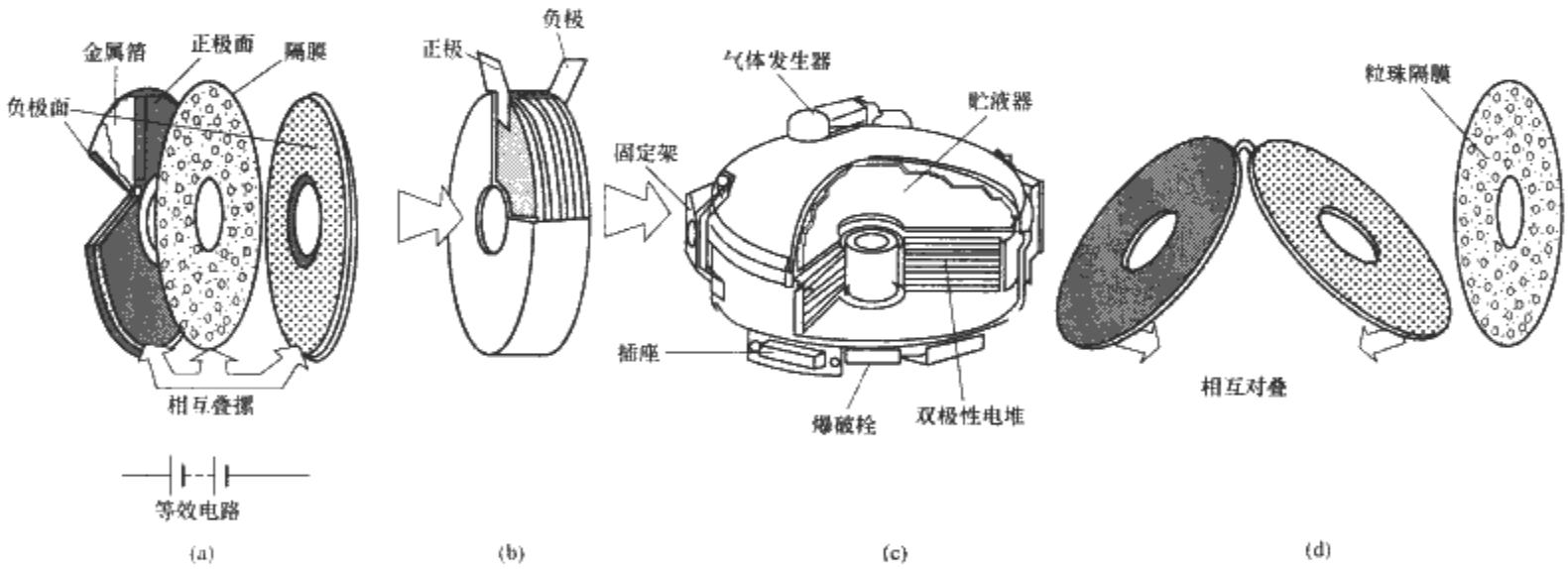


图 6.6-5 自动激活双极性锌/氧化银贮备电池机构原理示意图
(a) 双极片及叠摞；(b) 双极电堆；(c) 电池组剖面图；(d) 电级和隔膜

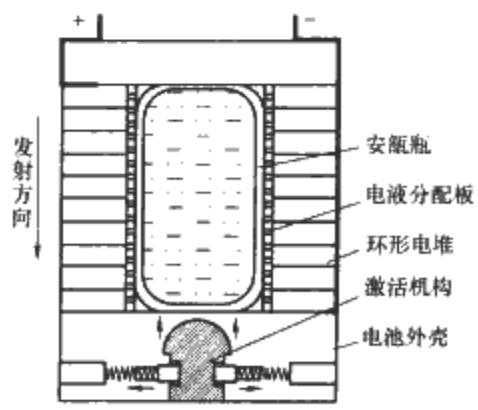


图 6.6-6 一种典型的安瓿形电池结构示意图

3.2 自动激活双极性锌银贮备电池

电池组部分由双极性的电极叠摞串联成电堆而得名。所谓双极性是在一片导电金属箔骨架的一面上压敷着化成后的正极活性物质氧化银，另一面压敷着负极多孔活性金属锌，即一片电极存在两种极性，见示意图 6.6-5。一般在相邻的双极板之间负极一侧粘有分布均匀塑料粒珠的隔膜，由此每两片双极板的一半就构成了一个单体电池。按照输出电压的要求，将若干个双极板叠加并压紧成堆就构成了串联的电池组，每片的金属箔就是相邻电池间的导电连接片。同时要求电堆头和尾两个端片是只压敷着活性物质的单电极片，已形成电池组的正负极。激活机构系统一般为塑料制成的半泡囊，也可以用波纹式不锈钢箔制成。激活时通过爆破栓打开注液口，高压下泡囊变形把电解液顺着爆破栓与电堆中孔间隙挤入电极堆。电堆的端片外侧设计有加热片，为在低温时外电给电池组加热。电池结构紧凑，激活时间短，电池激活必立即用，不能湿贮存。能量密度可达 50Wh/kg。多用在机动性强的战术导弹上做主控电源。

3.3 安瓿型贮备电池

将电液贮存在特定安瓿中（铜或玻璃瓶）周围是环状电堆，如图 6.6-6 所示。它的激活方式是利用炮弹发射的冲击与自旋将安瓿瓶打开，电液通过分配环进入电堆，而使电池工作。通常激活靠冲击与自旋结合的特殊机构来完成。最常见的安瓿贮备电池是采用 HBF_4（氟硼酸）或 $HClO_4$（高氯酸）的 Pb/PbO_2 电池；其贮液器为铜安瓿。电池的反应式为：

$$Pb+PbO_2+4HBF_4 \longrightarrow 2Pb(BF_4)_2+2H_2O$$

（开路电压 1.86V）

HBF_4 液态范围为 −78℃～130℃，高电导 $0.61\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$（23℃）、$0.06\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$（−60℃）。这种电池主要应用于炮弹引信电源上（如三七炮、112 榴弹炮）。高比能量锂/五氧化二钒（V_2O_5）、锂/二氧化硫（SO_2）及锂/亚硫酰氯（$SOCl_2$）等电化学系列也可制成安瓿型贮备电池（采用玻璃安瓿）。安瓿型贮备电池贮存寿命长，价格便宜，尤其锂贮备电池比能量高、工作寿命长，适用于高冲击、高自旋炮弹电源及其他领域，并有广泛发展前景。

4 热电池

4.1 镁/五氧化二钒热电池

镁/五氧化二钒热电池的正极活性物质是五氧化二钒，负极活性物质是镁。它通常以氯化锂—氯化钾二元低共熔盐为电解质。电池反应为

$$Mg+V_2O_5+2LiCl \xlongequal{} V_2O_4 \cdot Li_2O+MgCl_2$$

五氧化二钒热电池的特点是工作电压较高，在 400mA/cm² 工作电流密度时，单体电池峰值电压可达 2.5V，电噪声小，具有较强的环境适应性，生产工艺简单，适宜批量生产。其主要缺点是工作时间短，通常在 30s 以内。根据以上特点，镁—五氧化二钒热电池多用于反坦克导弹、炮弹等战术武器系统。

4.2 钙/硫酸铅热电池

钙/硫酸铅热电池以金属钙为负极，硫酸铅—氯化钾—氯化锂三元低共熔融盐为正极，氯化钾—氯化锂二元低共熔融盐为电解质。电池总反应为

$$PbSO_4+2LiCl+Ca \xlongequal{} CaCl_2+Li_2SO_4+Pb$$

单体电池为杯式结构，杯体同时作为正极集流体。加热片为锆/铬酸钡化学体系。钙/硫酸铅热电池的主要特点：①单体电池开路电压为 2.5V，稳态工作电流密度为 100～200mA/cm²，如图 6.6-7 所示。电池工作前期具有高的脉冲负载特性（>1A/cm²），工作寿命小于 60s；②工作环境温度范围（−40℃～50℃）；③低的机械特性，一般更多地用作地面控制系统电源，有时也用于弹上电源。

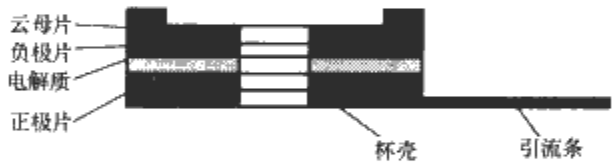


图 6.6-7 杯式单体电池结构

4.3 钙—铬酸钙热电池

钙—铬酸钙热电池的正极活性物质是铬酸钙，负极活性物质是钙。钙—铬酸钙热电池通常以氯化锂—氯化钾二元低共熔盐为电解质，电极结构多为 DEB 共融体片型（D 为 $CaCrO_4$ 去极剂、E 为电解质、B 为粘合剂）电池的反应式为

$$3Ca+2CaCrO_4+6LiCl \xlongequal{} 3CaCl_2+Cr_2O_3 \cdot 2CaO+3Li_2O$$

钙—铬酸钙热电池的特点是工作电压高，在 150mA/cm² 电流密度下，单体电压大于 2.4V；低电流密度下（≤15mA/cm²），可获得长的工作寿命（60min），但随工作电流密度增加，工作寿命明显衰减；内阻较小；可适应较宽的工作环境温度（−50℃～70℃）；并具有良好的机械性能（能承受 300rpm 的自旋及200 000m/s² 的冲击）。但是电池工作过程因钙—锂合金形成，易出现电噪声。在锂合金—硫化铁热电池问世以前，钙—铬酸钙热电池曾是热电池的主导产品，它广泛地应用于各类武器系统，如炮弹引信、炮弹、各种战术导弹、水下兵器，甚至某些战略武器系统。

4.4 锂合金—硫化铁热电池

锂合金的热电池的正极活性物质是硫化铁，负极活性物质是锂合金。用作热电池负极活性物质的锂合金有锂铝（LiAl）、锂硅（LiSi）、锂硼（LiB）及其他多元锂合金等。目前已投入工程应用的热电池所采用的合金，主要是锂铝（LiAl）和锂硅（LiSi）和金。锂硼（LiB）近来在研制中已有重要技术进展，其应用在长时间工作和高功率输出要求热电池中显示出极大的优越性。目前电解质通常选择 LiCl-KCl 二元或 LiCl-LiBr-KBr、LiCl-LiBr-LiF 三元共熔盐。其电池反应式为

$$4Li+FeS_2=2Li_2S+Fe$$

锂合金—硫化铁热电池的结构与组成如图 6.6-8 所示。该电池体系的优点是工作电流密度高，其稳态电流密度为 400～800mA/cm²，如图 6.6-9 所示；同时它的工作寿命长、工作电压平稳、无电噪声、内阻小和比特性高；此外，它还具有良好的机械性能（能承受 200000m/s² 的冲击）。但是该体系的缺点是工作电压偏低（单体电池电压 1.7～1.95V）。

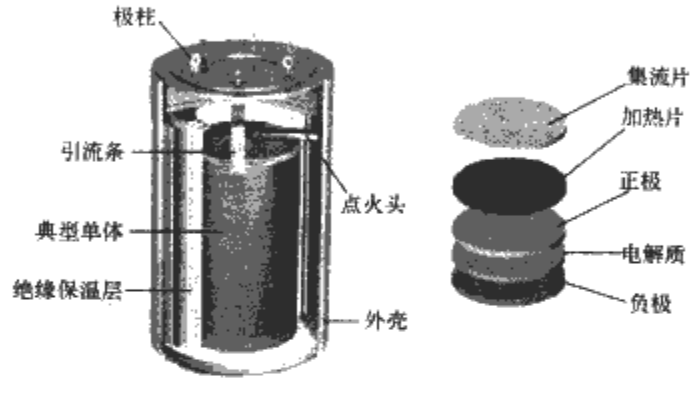


图 6.6-8 锂合金热电池的结构与组成示意图

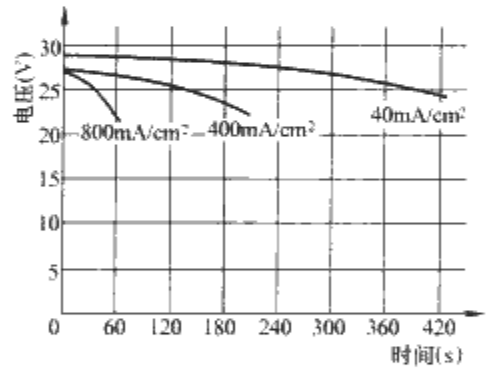


图 6.6-9 锂铝合金/硫化铁热电池的典型放电曲线

5 LAN/硫化物热电池

在激活的热电池中，纯金属锂负极工作在高于其熔点 181℃的温度下。为了防止熔融的金属锂到处流动造成电池短路，必须使用具有高比表面积的金属粉末粘合材料或者金属海绵来吸附锂，这种吸附主要是靠粘结材料的表面张力。

由金属锂与铁或镍构成的这种负极材料称为 LAN 材料。它是先把粘合材料和熔融的金属锂混合，然后把固化的混合物压延成箔片，通常厚度为 0.07～0.65mm。随后，这种箔材被冲切成与单体尺寸一样的负极零部件。冲切好的负极用铁箔制成的杯子包住，这杯子既防止锂的流出（它会造成电池短路），又可作为集流片使用。这样的金属锂负极可在温度超过 700℃的情况下正常工作。采用这种特殊的锂活性材料与硫化铁组成的热电池则称为 LAN/硫化铁热电池。这种电池能够有长工作寿命，可以输出高的比能量。这种电池的结构与图 6.6-8 相类似。据报道这种电池的比能量已达 100Wh/kg 以上。

第 7 章 蓄 电 池

蓄电池的基本特点是可以进行充放电，即可以将电能转换为化学能贮存起来，又可以将其再转换为电能。这一过程几乎能可逆地进行，并具有一定的能量转换效率；同时循环过程体系变化很小或变化缓慢，从而得到长的循环寿命。事实上，只有一部分材料能够成功地用于蓄电池体系。

蓄电池的应用主要分为两类：

(1) 蓄电池作为能量贮存装置，由主电源对其进行充电，当主电源失效或无法满足能量需求时，由蓄电池按要求供电。例如车辆启动、照明与点火电源、航天飞行器的贮能电源、不间断（UPS）电源、备用或应急电源（Back Up）和混合动力车（HEV）电源等应用。

(2) 蓄电池如同原电池一样放电，使用后在设备中进行充电或取出后单独进行充电。以这种方式使用蓄电池显示出经济性，因为它提供的总能量比原电池高得多。目前大部分消费类电子产品如随身听、电动剃须刀、电动牙刷、电动玩具、数码相机等；个人通信产品（手机、对讲机）、笔记本计算机、电动工具、电动车辆（电动自行车与电动车船）等所使用的蓄电池都属于此类应用。

传统的水溶液蓄电池除了可以进行再充电外，还具有较高的比功率、平稳的放电电压、较好的低温性能。然而，蓄电池的体积比能量和质量比能量通常比较低，而且荷电保持能力低于原电池。通过高比容量材料的使用，使某些蓄电池，如锂离子蓄电池具有较高的体积比能量，较好的荷电保持能力，同时其他性能也有一定程度的提高。但是对质子惰性溶剂的使用影响了电池比功率的提高，主要是由于这种溶剂的导电性低于水溶液电解质，这一缺陷可以通过增加电极表面积进行补偿。

在过去 20 年间，蓄电池发展异常迅速，在该领域中阀控式密封铅酸蓄电池的问世和大规模生产与应用；新型金属氢化物镍蓄电池和锂离子蓄电池的问世、大规模生产与应用，极大地推动了蓄电池的技术进步和不断扩展其市场应用范围。其中，20 世纪 90 年代末期新型锂离子电池广泛应用于消费类电子产品，在蓄电池产业中成为一个新的支柱产业，并且使蓄电池的实际比能量从原先的 30～40Wh/kg 大幅度的提高到质量比能量 150Wh/kg，体积比能量 400Wh/L 以上的水平，如图 6.7-1 所示。

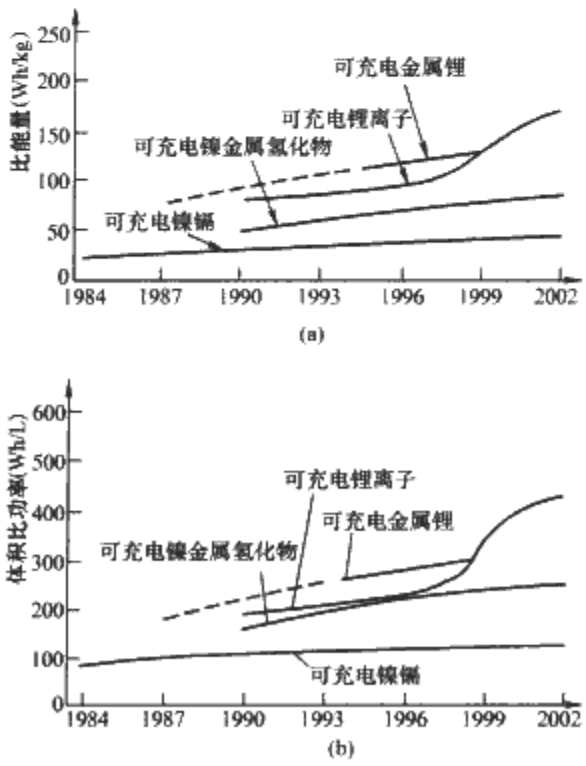


图 6.7-1 便携式蓄电池的技术进展

(a) 电池质量比能量（Wh/kg）；(b) 电池体积比能量（Wh/L）

1 蓄电池的类型和基本特性

表 6.7-1 列入了当今主要蓄电池类型、化学反应及其标称电压，显然按照所使用的电解质体系类型，蓄电池基本上可归纳为两大体系和四大类型，即水溶液电解质体系和非水电解质体系。其中水溶液电解质体系又包括两大类型，即：①酸性蓄电池，采用酸性水溶液电解质的蓄电池，铅酸蓄电池属此类型；②碱性蓄电池，采用碱性水溶液电解质的蓄电池，镉/镍蓄电池、金属氢化物/镍蓄电池、氢/镍蓄电池、锌/氧化银蓄电池和锌/氧化镍蓄电池属此类型。非水电解质体系也包括两大类型，即：①有机和无机非水电解质蓄电池，采用有机或无机溶剂/盐组成的液体电解质溶液的蓄电池，目前一般的商品锂蓄电池和锂离子蓄电池属于这一类型；②采用固体电解质的蓄电池，钠硫蓄电池和全固态锂或锂离子蓄电池属于这一类型。

表 6.7-1 主要蓄电池类型、化学反应及其标称电压

蓄电池名称	化学反应式	标称电压(V)
酸性电解质蓄电池(电解质：H_2SO_4 水溶液)		
铅酸蓄电池	$Pb+PbO_2+2H_2SO_4 \longrightarrow 2PbSO_4+2H_2O$	2.0
碱性电解质蓄电池(电解质：KOH 或 NaOH 水溶液)		
镉/镍蓄电池	$Cd+2NiOOH+2H_2O \longrightarrow Cd(OH)_2+2Ni(OH)_2$	1.2
金属氢化物/镍蓄电池	$MH+NiOOH \longrightarrow M+Ni(OH)_2$	1.2
氢/镍蓄电池	$H_2+2NiOOH \longrightarrow 2Ni(OH)_2$	1.2
锌/氧化银蓄电池	$Zn+Ag_2O+H_2O \longrightarrow 2Ag+Zn(OH)_2$	1.5
锌/氧化镍蓄电池	$Zn+2NiOOH+2H_2O \longrightarrow 2Ni(OH)_2+Zn(OH)_2$	1.65
非水电解质蓄电池(电解质：典型代表为有机溶剂/盐溶液或固体离子导体)①		
锂蓄电池	$Li+MnO_2 \longrightarrow LiMnO_2$	3.0
锂离子蓄电池	$Li_xC+Li_{1-x}CoO_2 \longrightarrow C+LiCoO_2$	3.6
钠/硫蓄电池	$2Na+S \longrightarrow Na_2S$	2.4

① 国际 IEC 标准化组织将这一体系称为非酸性、非碱性蓄电池体系，并将其标准化归口由 TC21 的 SC21A 分技术委员会管理。

当前全球蓄电池市场已超 200 亿美元。到目前为止铅酸蓄电池应用最为广泛，其中由于全世界汽车等车辆的继续增长，使 SLI 电池也继续占据了蓄电池总市场的主要市场份额，但是由于其他体系电池的广泛应用，这一份额呈现逐年减少。目前，碱性蓄电池的市场份额约占 25%左右。总的来说主要增长领域则是在使用小型蓄电池的消费类产品方

面，金属氢化物电池和锂离子蓄电池虽然只有短暂的历史（1989年和1990年先后问世），但在过去10年中它们不仅代表了便携式电池技术进展的方向，而且锂离子电池产品已占据了50%的小型密封蓄电池的市场份额。每种蓄电池的主要特点和典型应用概括在表6.7-2中。

表6.7-2 蓄电池的主要特点和典型应用

体系	特 点	应 用
铅酸电池		
汽车起动、照明、点火	广泛应用的低成本蓄电池，中等比能量，高倍率特性和低温特性好；可免维护设计	汽车，高尔夫球车，割草机，拖拉机，飞机，舰船等
牵引（动力用）	6～9h深度放电，周期性运行	工业叉车，电瓶运输车，电动车船和混合电动车，通过特殊设计可作为潜艇动力等
备用	可浮充电，长寿命，可采用阀控式密封设计	公用设施和电信的UPS系统，电网负荷平衡，贮能等
便携式	密封，免维护，成本低，浮充电性能好，循环寿命中等	便携式工具，小型电器与电子设备和装置等
镉/镍电池		
工业和FNC	高倍率性能、低温性能和浮充性能好，循环寿命长	航空、地铁、变电站等的应急电源系统，通信设备系统等
便携式	密封，免维护，高倍率性能和低温性能好，循环寿命长	铁路设施，消费类电子产品，便携式电动工具，对讲机，无绳电话、电动玩具、小型应急与备用电源等
金属氢化物/镍电池	密封，免维护，比能量高于镉镍电池	消费类电子产品和其他便携式设备，混合动力车等
铁/镍电池	耐用，结构坚固，长寿命，比能量低	运输机械，固定设施，机车
锌/镍电池	比能量高，循环寿命和倍率特性好	电动自行车，电动摩托车
锌/银电池	比能量最高，高倍率性能出色，循环寿命低，成本高	轻型便携式电子产品和设备；靶标，无人机，潜艇等武器装备；着陆器和空间探测器
氢/镍电池	循环寿命长（30%～70%的放电深度DOD），使用寿命长	主要用于空间应用，如用作LEO和GEO卫星储能电源
锂离子电池	质量比能量和体积比能量高，自放电低，循环寿命长	便携式和消费类电子产品（特别是手机和笔记本计算机、数码相机、便携式DVD等），电动车及空间应用等

2 不同蓄电池体系的特性比较

表6.7-3对不同蓄电池体系的性能进行了定性的比较。同一电化学体系不同设计的电池被评定为不同的等级，这正说明了设计特点对电池性能的影响。

可以看出，铅酸电池保持着广泛的应用，并在市场占有主导地位，关键的因素是相对较好的性能和循环寿命以及特别低廉的价格。而铅酸电池技术的一个重要技术发展是阀控式铅酸电池（VRLA）的问世与应用，大大拓宽了市场范畴；与铅酸电池相比，碱性镉/镍电池由于显示更长的循环寿命，更高的功率输出和优异的低温性能等，使其也成为自20世纪中期以来最为广泛应用的蓄电池之一。但是由于镉是致癌物质，由其造成的环境污染备受关注，致使小型镉/镍电池正在被比能量更高的金属氢化物/镍电池和锂离子电池所取代；金属氢化物/镍电池和锂离子电池是称之为绿色电池的两种新型蓄电池，在问世以来的十几年中，技术持续进步，产品性能不断提高。其中AA型金属氢化物/镍电池的容量已由最初的1400mAh提高至2800mAh；而18650型锂离子电池的容量也从最初的1200mAh提高至2400mAh。显然，两种电池的性能都翻了一倍。在扩展应用方面，高功率型金属氢化物/镍电池产品正式用于混合动力车，而高比能量型锂离子电池逐步增加了在电动自行车和其他电动车辆上的应用。

表6.7-3 各种蓄电池体系的性能定性比较①

体 系	体积比能量	比功率	放电曲线平稳性	低温性能	荷电保持	充电接受能力	效率	寿命	力学性质	成本
铅酸电池										
涂膏式	4	4	3	3	4	3	2	2	5	1
管式	4	5	4	3	3	3	2	2	3	2
密封式	4	3	3	2	3	3	2	3	5	2
金属锂电池	1	3	3	2	1	3	3	4	3	4
锂离子电池	1	2	3	2	2	1	1	1	3	2
镉/镍电池										
袋式	5	3	2	1	2	1	4	2	1	3
烧结式	4	1	1	1	4	1	3	2	1	3
密封式	4	1	2	1	4	2	3	3	2	2
铁/镍电池	5	5	4	5	5	2	5	1	1	3
金属氢化物/镍电池	3	2	2	2	4	2	3	3	2	3
锌/镍蓄电池	2	3	2	3	4	3	3	4	3	3
锌/银蓄电池	1	1	4	3	1	3	2	5	2	4
氢/镍电池	2	3	3	4	5	3	5	2	3	5

① 等级：1——→5，对应最好——→最差。

2.1 不同蓄电池体系的电压和典型放电曲线比较

图6.7-2给出了常规蓄电池在$C/5$倍率下的放电曲线。在水溶液电解质电池中，铅酸电池具有最高的放电电压。碱性蓄电池体系的放电电压范围为1.65（锌/镍）～1.1V。对于同一体系不同设计的蓄电池，在20℃下以$C/5$倍率放电时，其放电曲线的形状几乎没有区别。但是，以更高的放电倍率，在更低的温度下放电，其放电曲线的区别将非常显著，这主要是因为电池的内阻不同。

大部分常规蓄电池体系都具有一个平滑的放电曲线，只有氧化银电池体系的放电曲线具有两个平台，这主要是因为高价氧化银电极显示两阶段放电的特性。

锂离子蓄电池的单体电压比常规水溶液电解质电池的电压都高，但其放电曲线通常并不平坦，这是嵌入式电极反应的热力学特点所致。锂离子蓄电池的平均放电电压是3.6V，在电池组中可以用一只单体电池代替3只镉/镍或金属氢化

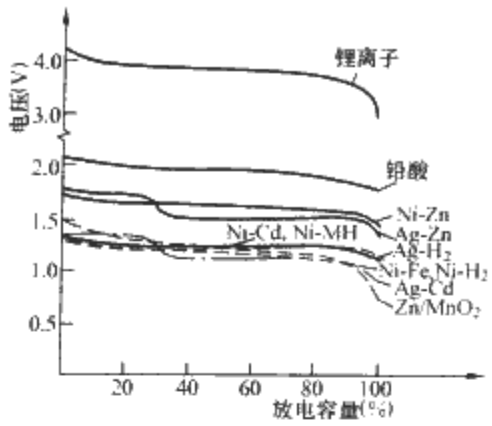


图 6.7-2 不同蓄电池体系以 $C/5$ 倍率放电时的典型放电曲线

物/镍单体电池。

2.2 不同蓄电池体系的温度特性的比较

在一个较宽的温度范围内，不同蓄电池的电性能（以质量比能量表示）如图 6.7-3 所示。图中给出了各种蓄电池体系在 −40℃～60℃，以 $C/5$ 倍率放电时的比能量。在高于 −20℃时，锂离子蓄电池的体积比能量最高，烧结式镉镍电池和金属氢化物镍电池低温下容量剩余率较高。除铁镍电池外，碱性蓄电池的低温性能通常好于铅酸蓄电池，而铅酸电池的高温性能较好。汇总这些数据既可以对比各蓄电池体系，也能反映各体系在最适宜放电条件下的电性能，特定的放电条件对电池的电性能的影响很大。

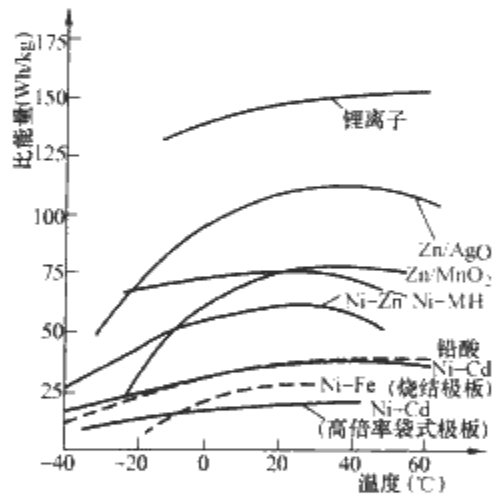


图 6.7-3 温度对蓄电池比能量（在 $C/5$ 倍率下）的影响

2.3 不同蓄电池体系的荷电保持能力的比较

大多数蓄电池的荷电保持能力都不如原电池，因此通常若要保证蓄电池随时处于可应用状态（或称备用状态），就必须进行定期充电或进行浮充电维持。大多碱性蓄电池，尤其是氧化镍为正极的蓄电池，能够以放电态长期贮存而不会造成永久性损坏，充电后即可投入使用。但铅酸电池却不能以放电态贮存，因为这将导致极板的硫酸盐化，从而影响电池的性能。

图 6.7-4 对部分蓄电池体系的荷电保持特性进行了比较。显然所有蓄电池的荷电保持特性都随着贮存温度的升高而升高，但其中锌/银蓄电池和锂离子电池在所有蓄电池体系中荷电保持特性最好。一般，锂离子电池在常温下的最低自放电率仅为每月 2%，低倍率银蓄电池的自放电率每年仅为 10%～20%。开口袋式和烧结式镉/镍电池以及锌/镍电池的荷电保持能力居中；而密封镉/镍和金属氢化物/镍电池以及铁/镍电池荷电保持能力最差。

图 6.7-4 中也汇出了碱性锌/二氧化锰电池的典型荷电性能，这里的电池正是特别设计可作为具有一定充电能力的可充电碱性锌/二氧化锰电池。

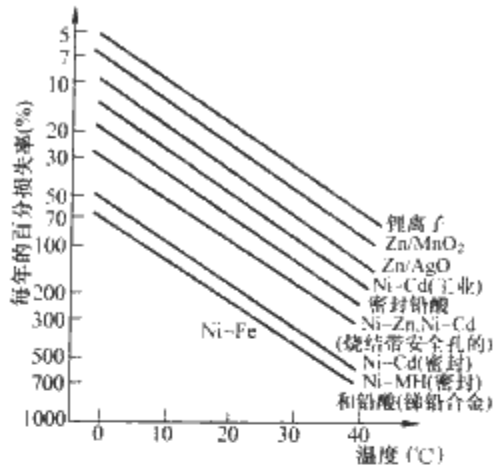


图 6.7-4 蓄电池的荷电保持性能比较

铅酸电池的荷电保持能力主要受电池设计、电解质浓度和板栅合金组成以及其他因素影响。采用标准铅锑合金板栅的标准汽车用 SLI 电池的荷电保持能力很差，这种电池在室温下经 6 个月的贮存后几乎没有剩余容量。采用低锑板栅的电池和免维护电池的荷电保持能力明显提高，每年容量损失约为 20%～40%。

金属锂蓄电池的一个潜在优势是具有很好的荷电保持能力，在很多情况下，其荷电保持能力与锂原电池相似。

2.4 不同体系蓄电池的循环寿命比较

不同体系蓄电池的实际寿命与电池的具体设计以及使用条件密切相关，特别是放电深度（DOD）和充电制度都会对电池寿命会产生很大的影响。

在蓄电池体系中，铁镍电池和开口袋式镉镍电池的循环寿命和工作寿命最长。为空间应用开发的氢镍电池在浅放电的情况下，表现出很好的循环寿命。铅酸电池的寿命无法和碱性电池相比，在铅酸电池中，采用涂膏式电极的电池循环寿命最短，采用管式电极可以获得最好的循环寿命，采用普兰特电极可以获得最好的工作寿命。

对于采用锌、锂等标准电极电位较负的材料作为负极的电池，一般难以进行有效的充电，并获得较长的循环寿命和工作寿命。然而近期锌/镍电池的循环寿命有所提高，同时新发展起来的锂离子电池却显示了良好的循环寿命。

2.5 不同蓄电池体系的充电特性比较

水溶液电解质蓄电池大部分都可以进行恒电流充电，而且这通常是一种首选的充电制度。然而在实际使用中，有时采用恒电压充电。开口式镉/镍电池具有最好的充电特性，可以用多种充电制度在很短的时间内充好电，这种电池可以在一个很宽的温度范围内充电，并能承受一定程度的过充电而不会受到损坏。铁/镍电池、密封镉/镍电池和密封金属氢化物/镍电池也具有很好的充电特性，但是充电温度范围较窄。金属氢化物/镍电池对过充电很敏感，充电时应防止电池过热。铅酸电池的充电特性也很好，但是必须防止过度的过充电。锌/氧化银电池对充电非常敏感，过充电将会对电池造成严重的损坏。而锂离子电池必须采用恒电流—恒电压充电制式进行充电。

表 6.7-4 总结了不同蓄电池体系的典型充电条件。但是，由于不同的生产工艺，所以在实际使用中，应参照本书中详细介绍每种电池的章节和制造商的建议对电池进行充电。

表 6.7-4 蓄电池的充电特性

体系	充电制度①		推荐的恒流充电倍率 C	过充电能力	充电温度范围（℃）	效率②	
	最优	不推荐				Ah（%）	Wh（%）
锂离子电池	cc，cv		0.20	没有	−20～50	99	95
涂膏式铅酸电池	cc，cv		0.07	一般	−40～50	90	75
管式铅酸电池	cc，cv		0.07	一般	−40～50	80	70
工业开口镉镍电池	cc，cv		0.2	出色	−50～40	70	60
烧结开口镉镍电池	cc，cv		0.2	出色	−50～40	70～80	60～70
密封式镉镍电池	cc	cv	0.1～0.3③	出色	0～40	65～70	55～65
金属氢化物/镍电池	cc	cv	0.1③	一般	0～40	65～70	60
铁/镍电池	cc	cv	0.2	出色	0～45	80	70
锌/镍蓄电池	cc，cv		0.1～0.4	一般	−20～40	85	75
锌/银蓄电池	cc		0.05～0.1	差	0～50	90	70

①恒流（cc）包括两阶段充电，恒压（cv）包括改进的恒压充电。

②所有数据是在室温下以标准倍率充放电得到的。

③在有充电控制的情况下可以进行快速充电。

为了满足用户在 2～3h 能内充满电的要求，很多制造商推荐采用“快速”充电的方法。这种充电方法要求在电池出现析气量、压力或温度过高前停止充电，因为这会导致电池排气或出现更严重的安全性问题，也可能对电池的性能和寿命造成损害。许多蓄电池体系还可通过采用脉冲充电来提供更高的充电速率。

总的来说，控制技术对于大部分蓄电池的充电有着重要作用，包括防止过充电、实现快速充电、在出现潜在不利和不安全条件时终止充电或将充电电流减小到一个安全的水平。同样，放电控制也用于维持单体电池均衡和防止过放电。

另一种充电控制方法是“智能”电池，这种电池具有下列特点：

（1）可以控制充电以保证电池的最优充电和安全。

（2）能够进行电量计量，显示电池中的剩余电量。

（3）具有安全装置，在出现不安全和意外时进行报警或切断电路。

2.6 不同蓄电池体系的成本比较

到目前为止，铅酸电池是成本最低的蓄电池，特别是 SLI 电池。牵引用铅酸电池和固定式铅酸电池由于具有高成本的结构，同时产量有限，所以成本要比 SLI 电池要高，但是依然要低于其他蓄电池。镉/镍电池成本稍高，随后是金属氢化物镍电池。电池的成本主要取决于单体电池的尺寸和容量，小型扣式电池比大一些的圆柱形电池和方形电池的成本高。

最昂贵的常规蓄电池是锌/银蓄电池。高成本和低循环寿命限制它们只能用于特殊用途，主要是军事和航天，这些应用均需要很高的能量密度。由于特殊的耐压设计和相对小的产量，氢/镍电池也非常昂贵，但是在浅放电条件下出色的循环寿命使其在航天领域极具优势。圆柱形锂离子电池的成本一直随着产量的增加不断降低。同时近期随着镍的价格成倍上涨，它的成本逐渐接近金属氢化物/镍电池的单位瓦时成本，作为电动车和储能用蓄电池的应用前景十分看好。

第 8 章 铅 酸 电 池

铅酸电池是一种传统的蓄电池，其正极活性物质是过氧化铅（PbO_2），负极活性物质是海棉状铅（Pb），电解液是浓硫酸的水溶液。该电池体系发展已有 100 余年的悠久历史，但由于其适合的使用性能和低廉的成本，依然是目前使用最为普遍和广泛的蓄电池。

早在 1854 年 Josef Sinsteden 将铅极板放置到稀硫酸中实验时，发现了铅酸蓄电池的基本作用原理；接着 Gaston Plante 于 1859 年利用卷式铅电极，用橡胶圈隔离演示了最早期的“普兰特”铅酸蓄电池技术（重复充放电产生活性铅化合物层），开创了铅酸蓄电池的实用化进程。此后 Camille Faure 在 1881 年引进了多孔隔板（毡）；Ernest Volckmar 在 1881 年引进了铅板栅和实现了铅粉的压入，同时在板栅中使用了铅锑合金，提高了板栅的硬度；Gladstone 和 Altred Tride 则于 1882 年提出了著名的“双硫酸盐化理论”，由此得以完整的描述了铅酸蓄电池的总反应。在此后的技术改进中，使铅酸蓄电池的容量和寿命不断提高。在实用化进程中，特别要提到薄木板作隔板的引进（1902），及“管式极板”的发明（1910）。直到 1950 年，才发展了电多孔塑料管制备的玻璃纤维软管取代硬橡胶和 1965 年用玻璃纤维/塑料编织袋作进一步取代。

现代铅酸蓄电池的发展则是基于对材料、配方和结构设计以及制造技术的不断进步的结果。其中包括了 Haring 和 Thomas 对铅钙合金（1935）的研究；1956～1960 年 Bode 等人对两种二氧化铅晶体（α 和 β）性质的阐明；20 世纪 70 年代 McClellan 和 Davit 等对卷绕密封铅酸电池商业化开发。此外拉网板栅、塑/金属复合板栅、玻璃纤维和改良型隔板、单体电池穿壁连接、塑料壳与盖热封组件等的出现以及 20 世纪 80 年代阀控密封电池的问世与应用，都极大地拓宽了铅酸电池的技术发展与应用范畴。

1 铅酸电池的类型和特征

按照使用特点，铅酸蓄电池可以划分为起动型、牵引型、固定型和便携式电池四大类。便携式电池基本都是采用阀控式密封电池设计。其他类型电池也有用这种设计的。由于阀控式铅酸蓄电池的原理、设计与工作制式等有很大不同，因此对这种电池将单独进行介绍。表 6.8-1 列出了铅酸电池的类型、特征和典型应用，从电池内部构型来看，电极有板状和管状两种。一般管式结构用于长寿命电池，而板状电极结构多用于要求功率输出高的应用，如引擎起动等。

表 6.8-1 铅酸电池的类型和特征

类 型	结 构	一般用途
起动型	平板状涂膏极板（可设计为免维护结构）	汽车、轮船、飞机、其他车辆用起动、照明和点火电源
牵引型（含车辆与潜艇动力型）	平板状涂膏极板；管状和排管极板	工业叉车（材料搬运）

续表

类 型	结 构	一般用途
牵引型（含车辆与潜艇动力型）	平板状涂膏极板；管状和排管极板；也包括混合结构	电动车辆，高尔夫球车，混合动力车，矿车，载人车等
	管状极板；平板状涂膏极板	潜艇
固定型（包括能量储存型，如组成太阳电池光伏系统和用于电网调峰平衡等）	管状和排管极板；圆形锥体极板	备用紧急供电系统；电话交换机；不间断电源系统（UPS），负荷平衡，信号系统
便携式	平板状涂膏极板（胶体电解质，电解质吸收在隔板中）；卷绕电极；管状极板	消费和设备用；便携工具；电器；照明，紧急照明、广播、电视，警报系统等

2 铅酸蓄电池工作原理

2.1 铅酸蓄电池中的化学反应过程

铅酸蓄电池的充电、放电过程相应于以下的化学反应方程式。

电池的总反应式

$$Pb+PbO_2+2H_2SO_4 \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} 2PbSO_4+2H_2O$$

在放电过程中，负极的铅（活性物质）以及正极的二氧化铅被转变为硫酸铅。这里的硫酸是以硫酸根离子的形式参加反应的，生成水表明消耗了硫酸，并且在反应过程中硫酸被稀释了，硫酸的密度降低。

充电时，正好和这个过程相反。

负极

(1) $Pb \rightleftharpoons Pb^{2+}+2e^-$

(2) $Pb^{2+}+SO_4^{2-} \rightleftharpoons PbSO_4$

(3) $Pb+SO_4^{2-} \rightleftharpoons PbSO_4+2e^-$

上述反应过程产生的电子通过负极进入外电路。

正极

(4) $PbO_2+4H^++2e^- \rightleftharpoons Pb^{2+}+2H_2O$

(5) $Pb^{4+}+2e^- \rightleftharpoons Pb^{2+}$

(6) $Pb+SO_4^{2-} \rightleftharpoons PbSO_4$

(7) $PbO_2+SO_4{}^{2-}+4H^++2e^- \rightleftharpoons PbSO_4+2H_2O$

上述反应过程得到的电子通过外电路进入正极。

在充电过程中，带正电的氢离子从正极迁移到负极。另外，在充电过程中，向正负极都要提供硫酸根离子。硫酸根离子和氢离子结合生成硫酸

$$4H^++2SO_4^{2-} \rightleftharpoons 2H_2SO_4$$

则总的电池反应方程式为

(8) $Pb+PbO_2+2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4+2H_2O$

如上所列，正负极电极反应适用溶解－沉淀机理而不是固态离子传递或者膜形成机理，这种充放电理论被称为双硫酸盐化理论。由于电解质中的硫酸在放电过程中被消耗，产生水，所以电解质是一种活性物质，因而在特定的电池设计中也是一种限制容量的活性物质。

电池在过充电时会发生下述反应

(9) 负极　$2H^+ +2e \longrightarrow H_2$

(10) 正极　$H_2O-2e \longrightarrow 1/2O_2+2H^+$

(11) 总反应　$H_2O \longrightarrow H_2+1/2O_2$

若在合适条件下（如在催化剂存在下或在密封电池设计条件下），上述反应中的氢气和氧气可以通过复合反应回复到水。

2.2　铅酸蓄电池电解质密度选择及其在电池中的作用

由电池中的化学反应得知电解质是参加到电池反应中的物质，因此它对电池性能的影响是很大的。图 6.8-1 给出了铅酸电池充放电过程中电压、电解质密度及容量的变化关系特征曲线。当电池恒电流放电时，工作电压逐步平稳的降低到终止电压，而此时电解质的密度也相应按照放出的容量成比例的降低。

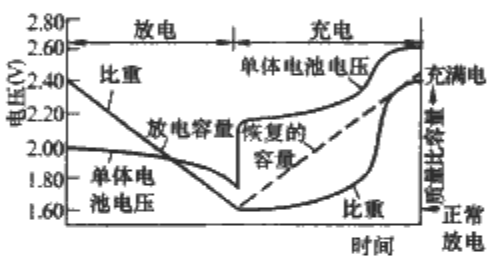


图 6.8-1　以恒电流放电和充电时铅酸电池的电压、密度和容量的变化关系

电解质的密度必须足够高以满足高离子电导和电化学反应的需求，但是密度又不能太高，以防止隔板降解和对其他部件的腐蚀，导致缩短寿命和增加自放电。在高温的条件下，电解质的密度会下降。在充、放电过程中，电解质的密度都是随着充进或放出容量的多少等比例增加或降低。因此，电解质密度可以成为一种检测电池荷电状态的方式，如表 6.8-2 所示。但是，电解质密度的变化有一定程度的滞后，这是因为电解质的完全混合要等到接近满荷电状态，电池开始析气后才能完成。

表 6.8-2　不同设计的铅酸电池在不同荷电态下的电解质密度

荷电态	密度			
	A	B	C	D
100%（满荷电）	1.330	1.280	1.265	1.225
75%	1.300	1.250	1.225	1.185
50%	1.270	1.220	1.190	1.150
25%	1.240	1.190	1.155	1.115
放电态	1.210	1.160	1.120	1.0

注　1. 假设为富液电池。

2. 按不同的设计电解质密度在全充放电态之间变化，可有 100～150 个点的区间，A 为电动车电池；B 为牵引电池；C 为 SLI 电池；D 为备用电池。

铅酸电池的标称电压为 2V。分析表明电池的开路电压是电解质浓度的直接函数，如 Nersnt 方程所示

$$E=2.047+\frac{RT}{F}\ln\left(\frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}}\right)$$

由此计算可以得出，电池开路电压在电解质密度为 1.28 下的 2.125V 到电解质密度为 1.21 下的 2.05V 之间变化，如图 6.8-2 所示。

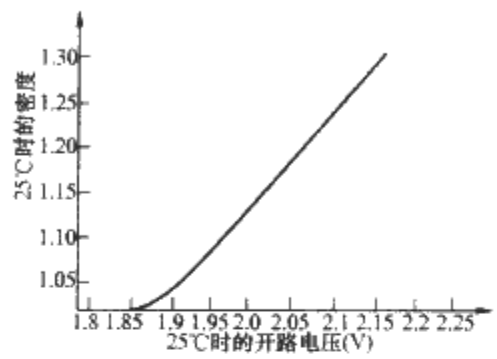


图 6.8-2　铅酸电池的电压与电解质的密度关系

2.3　铅酸蓄电池自放电产生的机理

因为铅酸蓄电池的放电态是热力学稳定态，由此铅酸电池的自放电率相当快，不过可以通过特定的设计而大大减小自放电率。

自放电率的大小取决于几个因素。铅和二氧化铅在电解质中是热力学不稳定的，在开路状态下，他们可以同电解质发生反应。正极产生氧气，负极产生氢气，自放电的速度取决于温度和电解质的浓度（随着电解质浓度的提高析气速率加快），反应式如下

$$PbO_2+H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4+H_2O+\frac{1}{2}O_2$$

$$Pb+H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4+H_2$$

对于大部分的正极，通过自放电生成 $PbSO_4$ 速度很慢，在 25℃条件下，通常远小于 0.5%/天（一些使用无锑合金板栅制造的正极板，在开路状态下，电池通过其他的机理失效，也就是板栅－活性物质阻挡层的生成）。负极的自放电通常更加迅速，特别是当电池的电解质被具有催化作用的其他金属离子污染的时候。例如，由于腐蚀从正极板栅游离出的锑扩散到负极，沉积下来，从而导致局部放电将海绵状铅转化为 $PbSO_4$。在 25℃条件下，使用铅锑合金制作的新电池的自放电率可以达到 1%/天，当电池老化后，自放电率可能达到（2%～5%）/天。使用无锑合金制作的电池，其自放电率小于 0.5%/天，而且与电池的使用时间没有关系。由此，对于免维护干荷电电池，必须使用低锑或无锑合金（如铅钙合金）板栅使电池的自放电率达到最小。然而，由于锑在电池中的有益作用，将锑完全剔除可能不是一个很明智的做法，使用低锑合金是一个很好的折中方法。

自放电和温度有关，一般也可以通过将电池储存在 5～15℃的环境下来减小电池的自放电率。

3　电池结构和主要部件

3.1　电池结构类型

铅酸蓄电池的结构分类有以下 3 种方式，其中包括：

(1) 开口与密封电池之分。早期电池壳体的顶部是敞开

的，水可以无阻碍的蒸发，酸雾也污染着环境，同时也不能确保杂质不进入到电池中去。这种电池称为“开口电池”。与此相对应，则有“密封电池”，一般称为“阀控式密封电池”或阀控铅酸蓄电池（VRLA 蓄电池），实际上它是“免维护的”，不存在补水问题。

“开口”意味着准许打开，现在的电池可以采取各种不同设计的塞子与外界隔开，但不能确保外界和电池内部完全不漏气。标准的开口电池当然是少维护的，因而须要从顶部添加纯净水（如蒸馏水或去离子水）。显然电池为了加水必须是有孔的。

由于 VRLA 电池是免维护的，因此是不需要加水孔的。

（2）以极板的种类划分电池的类型，如平板式涂膏电极电池和管式电极电池（一般正极为管式）。

（3）依据单体电池和整体电池进行分类，有单体电池和整体电池之分。单体电池表示为额定电压 2V；整体电池可以有额定电压 4、6、12V 和 24V（现在正发展 36V 体系），它是表示在一个电池壳中有若干连接在一起的单体电池。

3.2 电池的典型内部结构

铅酸电池由几个主要的部件构成，如图 6.8-3 所示。该图是一个电池的内部部件与整体结构图。各种用途的电池在结构上是大体相似的，但电池的各种不同的应用决定了电池的具体设计、尺寸、质量和所使用的材料。

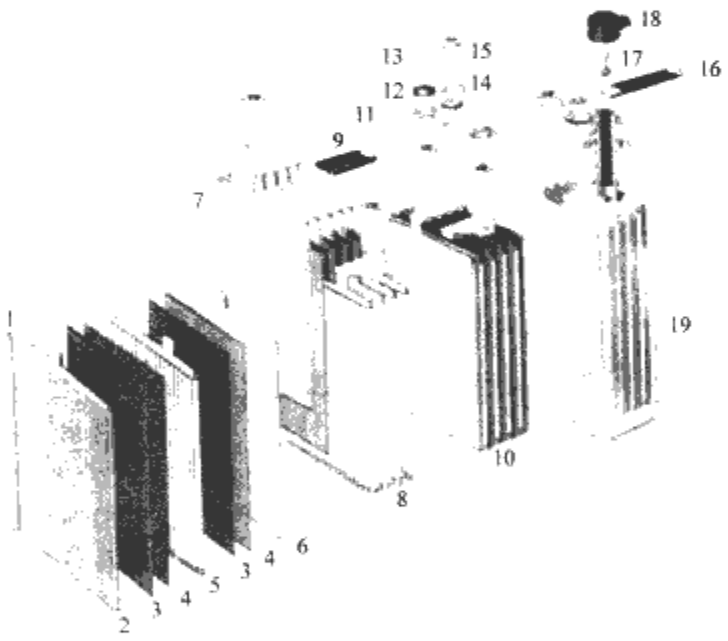


图 6.8-3 铅酸电池典型的基本结构图

1—绝缘边框；2—负极柱；3—微孔隔板；4—穿孔波纹隔板；5—管式正极板；6—板栅式负极板；7—焊有极柱的负极组；8—焊有极柱的正极组；9—盖板；10—极板组；11—盖子；12—极柱密封；13—密封垫；14—带有密封圈的阀座；15—气体干燥塞；16—电池连接片；17—带有螺母的螺栓；18—极柱帽；19—容器透明的电池

3.3 电池的关键部件

3.3.1 板栅

板栅的作用是支撑活性物质，以及在活性物质和端子之间传导电流。曾研究了用铅以外的物质提供导电体的可能性，其中的一些有比铅更好的导电性（如铜、铝、银等）。但是这些替代金属在硫酸电解质中不具有抗腐蚀性能，而且价格都比铅合金高。有人研究了钛作为导电材料的可能性：在经过特殊表面处理后它不会被腐蚀，但是钛的价格非常昂贵。在一些潜艇电池中使用铜板栅作负极材料。

通常的板栅设计为矩形框，有一个小极耳用来和汇流排连接，图 6.8-4 示出了两种典型的浇铸板栅，其中一种是传统设计的板栅。

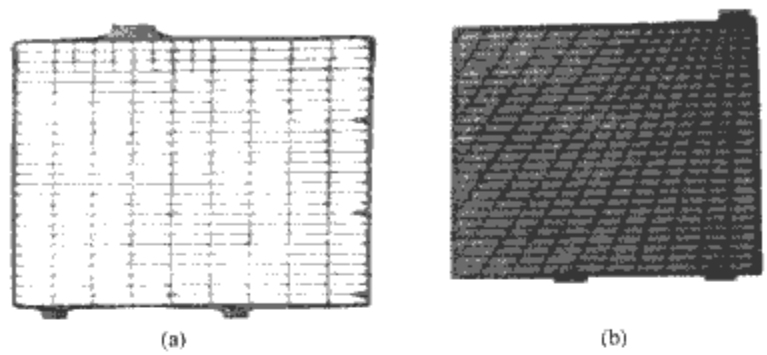


图 6.8-4 铅酸电池浇铸板栅

（a）传统的浇铸板式板栅；（b）辐射状设计板栅

另外一种生产板栅的方式是通过对条状或块状铅合金进行机械处理来得到并用电化学方法形成了所谓“普兰特式”（见图 6.8-5）或“曼彻斯特式”的极板。

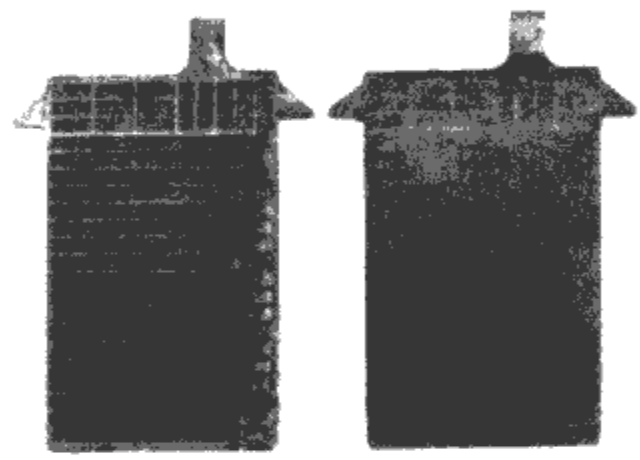


图 6.8-5 “普兰特式”铅酸电池浇铸板栅

（a）“普兰特式”板栅；（b）“普兰特式”极板

最新的一种板栅乃是切拉网板栅，即将铅先浇铸成带状，然后在机器上切拉成板栅，如图 6.8-6 所示。这种板栅的优势是使每个电池具有更轻的板栅质量；可以用最少的设备投资，生产出各种不同尺寸的板栅，达到非常高的生产能力（可以达到 600 片/min）；同时具有非常好的均匀一致性；而且也可以使用不含锑的铅钙锡合金（见图 6.8-6）制造切拉网板栅。我国最大铅酸电池制造公司已经引进了这种设备，开始大规模生产用于汽车用密封免维护起动电池的板栅。

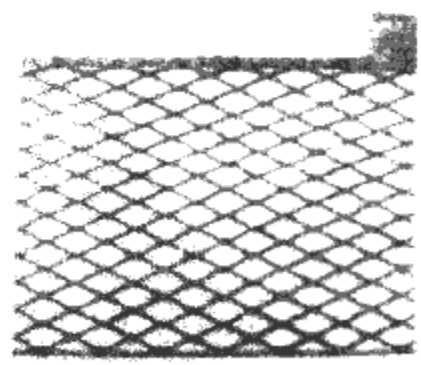


图 6.8-6 铅酸电池用切拉加工板栅

3.3.2 极板

用于铅酸电池的极板有两种形式，即平面涂膏式极板

和管式极板。涂膏极板是将铅膏涂覆在板栅上形成的电池极板，如图 6.8-7 所示。铅膏是由铅粉（PbO+Pb 等）、导电剂（碳黑）、膨胀剂（负极用）等和硫酸按一定比例配制而成，极板涂完以后，被挂起或者层叠放置进行固化。有一些高负载电池设计中也采用了平板式负极和管式正极。这种用于管式极板的板栅可以采用浇铸或者压铸的方法制造，这种板栅由许多连接在横梁和极耳上的带有侧翅的筋条排列组成。筋条的外面套上单独编制的玻璃丝套管或者多管的排管。然后向这些套管中填充铅粉或泥浆状铅膏，直到这些管子被灌满。最后将一个塑料的封底塞入管子的开口端，使这些塑料封底成为极板的底部，如图 6.8-8 最右图所示。



图 6.8-7 涂覆活性物质形成的涂膏电极

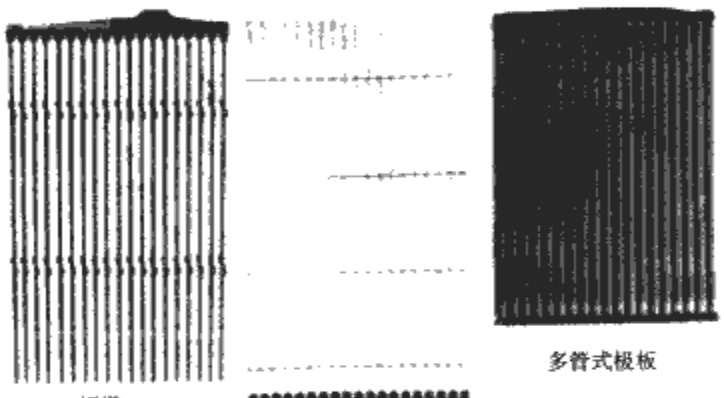


图 6.8-8 管式极板和采用的板栅

3.3.3 电池隔板

隔板是铅酸电池的一个重要部件，它用来隔离正负极板，同时又需要有足够的孔率，允许酸迁入或迁出极板。由于选择用于铅酸电池的隔板必须耐浓硫酸的化学侵蚀，因此选择的材料范围非常局限，曾经使用过木隔板、橡胶隔板、现在多采用更耐酸的聚合物（如聚乙烯等）和玻璃纤维（用于阀控式密封电池）等。隔膜性能的不断改进与提高，使电池的性能和寿命也不断有相应的提高。

最简单的电池由一片负极板，一片正极板和一片隔板组成。大部分实用的铅酸电池由 3～30 块极板及其间隔的隔板组成。一般使用片状隔板，但使用袋式隔板将正极、负极或者二者都包起来的方法在小型密封电池、SLI 电池、动力电池、和备用电池中应用越来越普遍了，这样有助于生产和控制生产过程中的铅污染。

起动型电池通常使用烧结 PVC 隔板，现在的趋势是使用袋式或者片式多孔聚乙烯隔板，这种隔板的平均孔径为 5～30μm。重负载的电池常常使用多孔橡胶隔板或者聚烯烃（主要是聚乙烯）隔板，这种隔板成本更高，但是具有更长的使用寿命。有的隔板上附有薄层玻璃纤维毡以提高电解质的保存能力。

工业用牵引涂膏正极板通常会用几层玻璃纤维毡包裹极板，这样有助于电池充放电过程中活性物质的支撑。里层由许多非常细小的平行排列的玻璃丝制成的玻璃毡，下一层是使用塑料粘接的随机排列的玻璃毡。这些毡被包裹在热封的打孔橡胶壳体中。许多重负载电池在隔板的肋上用一层玻璃纤维毡来保持活性物质。

4 电池制造工艺流程简介

图 6.8-9 表示出典型的铅酸电池的制造工艺流程，供参考。

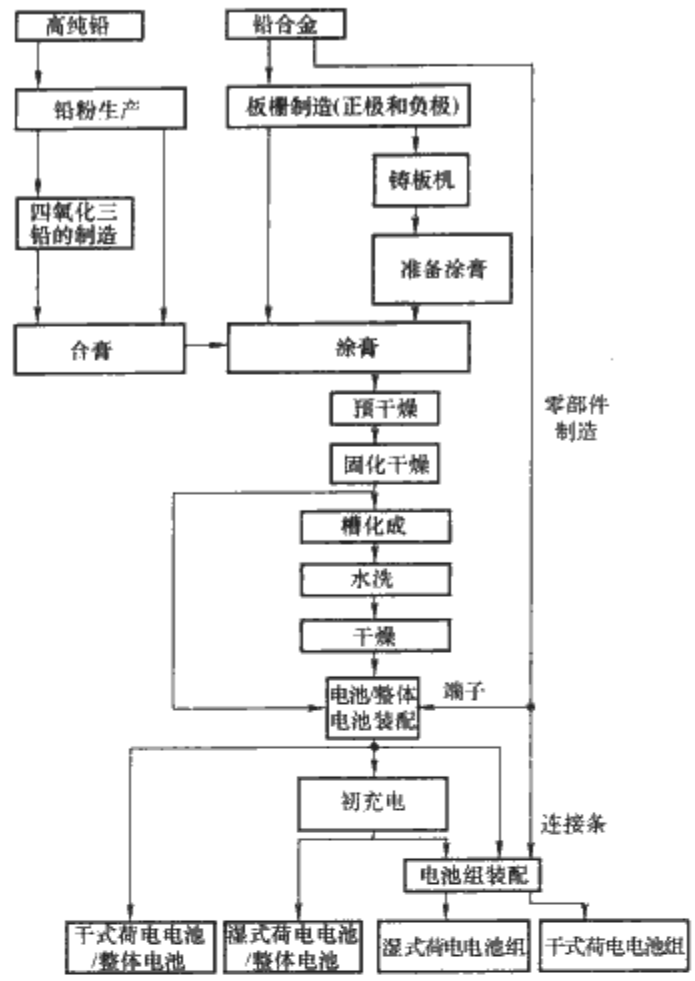


图 6.8-9 铅酸电池的典型制造工艺流程

5 起动型（SLI）电池

SLI 电池的主要功能是用来起动内燃机，放电时间很短，但是电流很大。为了使起动能力最大化，SLI 电池设计强调采用最低电阻板栅（使用不同的放射和切拉的板栅设计）的极板，使用比动力型电池或固定型电池更高的电解质密度。目前，免维护 SLI 电池的问世是起动型电池技术进步的重要标志之一，它在电池寿命期间不再需要补水、贮存期间的容量保持性能显著改善、端子腐蚀大大降低等。与传统的小型密封铅酸电池通过氧气再化合的方式相比，这种电池主要通过充电控制来阻止水的分解和干涸。

5.1 结构及关键组成

图 6-8.10 表示出另一种精制的 SLI 电池结构设计图。在这种设计中，采用的电池极板宽度约为传统电池的五分之一，而且与长度方向平行插入，而不是垂直插入。这种设计减少了电池的内部电阻，使电池显示很高的冷起动性能。卡车、公共汽车、建筑设备上使用的重负荷 SLI 电池的设计与客运车辆 SLI 电池相似，但是使用了更重、更厚的极板，使用了高视密度的铅膏；使用价格较高的带有玻璃纤维衬的隔板，将极组固定在壳体底部；同时使用橡胶壳体，以及其他一些类似措施，由此增长了电池的寿命。为了避免大电池壳体强度不足问题，一般也可以使用普通电池的串联或者串联－并联方式连接。通常情况下，12V 整体电池串联用于 24V 起动，并联用于运行和在 12V 条件下充电。现在也有几种重负荷免维护电池生产。

免维护电池的一个最主要的特征就是使用无锑合金（如

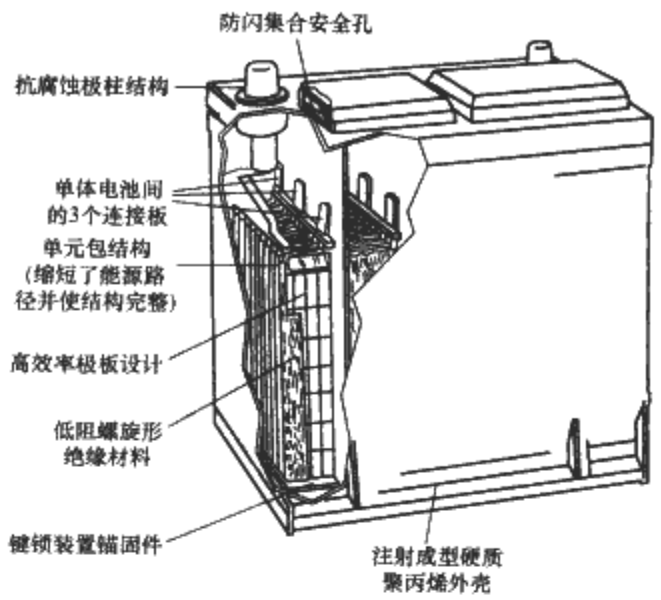


图 6.8-10 一种典型的 SLI 铅酸电池剖面图

铅钙合金），或者低锑合金板栅。这些板栅材料的使用显著减少了过充电电流，也减小了过充电期间水的损失，提高了贮存性能。实际上大部分的 SLI 电池使用所谓的混合极板，负极板使用铅钙锡合金制作板栅，正极板使用低锑合金制作板栅。

5.2 工作性能

5.2.1 典型放电性能

图 6.8-11 所示曲线是 SLI 电池在几种恒电流放电情况下的典型放电曲线，相应的终止电压也明确显示于图中。由图可以看出，在较低的放电率下，可以得到更高的放电容量。而在高放电率下，由于电解质的扩善速度不够快，以致极板毛细孔中的电解质会被耗尽，而不能维持电池电压稳定。显然，间歇性的放电，能够有助电解质再循环，或者通过电解质强制循环都可以改善电池的高放电率性能。通常，电池可以在其允许的任何放电电流下工作而不会对电池造成损害，但是当电池被耗尽或者电压低于可用值的时候，应该停止放电。

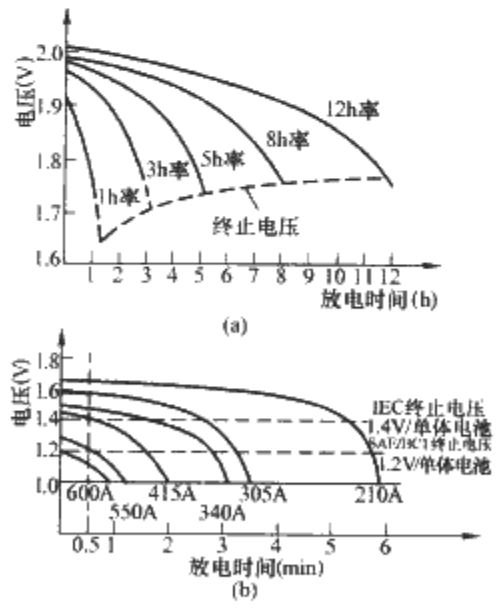


图 6.8-11 SLI 铅酸电池放电曲线
(a) 25℃、不同小时率下；(b) −17.8℃、不同的高放电率下（在 25℃、20h 率的 70Ah 电池）

由于 SLI 铅酸电池必须适用于内燃机起动和车辆照明和点火等要求，因此考察这种电池的性能中有两个重要指标，其中之一就是冷起动性能。冷起动电流（CCA）测试就是用来评价在低温条件下，电池给出电流对引擎进行起动的能力。冷起动电流就是满荷电的电池在−17.8℃条件下，放电 30s，终止电压为 1.2V/单格条件下所能够放出的电流。由图 6.8-11（b）放电曲线看出，该容量为 70Ah 的 SLI 铅酸电池在−17.8℃条件下的冷起动电流为 550A。

另一个重要指标则是储备容量测试，它是为了检验电池给照明、点火和其他附属的设备提供电能的能力。贮备容量测试的方法是满荷电电池在 25℃条件下，以 25A 放电至 1.75V/单格放电的分钟数。从图 6.8-11（a）放电曲线看出，容量为 70Ah 的 SLI 铅酸电池在 25℃条件下的贮备容量大约为 180min，即 3h。

5.2.2 温度特性

放电率和放电温度对铅酸电池的性能有着明显影响，如图 6.8-12 所示。一般放电温度越高和放电率越低，电池的放电电压和放电容量越高；同时虽然铅酸电池可以在很广的温度范围里使用，但是在高温环境下连续工作时会造成板栅的加速腐蚀，从而缩短电池的使用寿命。

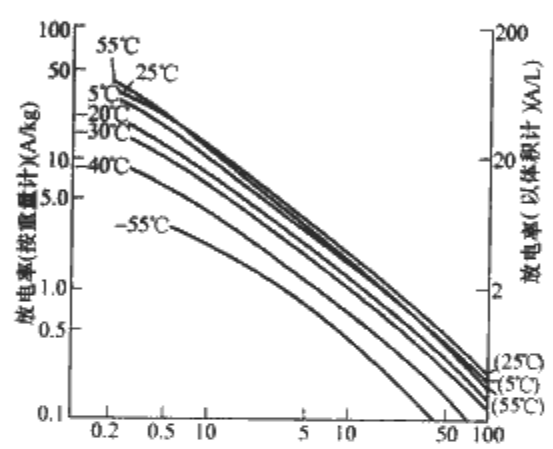


图 6.8-12 至单体电池电压 1.75V 时，SLI 铅酸电池的工作时间

5.2.3 放电特性

铅酸电池开路贮存期间会自放电，而且是在采用铅锑合金板栅的电池中更加严重。按照前面已做出的自放电机理分析可知，由于自放电引起的容量损失可以通过测量端电压变化或者电解质密度变化来简单测定。它主要归至为硫酸在负极与锑和铅交界面上形成的微电池反应，产生细粒状硫酸铅并造成自放电。使用无锑的铅钙合金作负极和铅锑合金作正极制造的电池，直到锑从正极扩散到负极之前，自放电损失都是很小的，特别是采用低锑合金制作正极的电池更为有效。

5.2.4 寿命特性

总的来说 SLI 铅酸电池的使用寿命特性在不断增长中，但是由于使用条件的差别很大，只能用一个统计的平均值加以描述。即目前的电池寿命大约在 24～36 个月之间。特别要指出的是这种电池不耐深放电循环，在那种条件下电池寿命会大大缩短。

5.3 SLI 铅酸电池和电池组型号、尺寸

SLI 电池的尺寸已经由汽车工业的汽车工程师协会（SAE）以及电池工业的国际电池协会（BCI）进行了标准化，每年 BCI 出版发行最新的电池标准。在国际范围内，标准化工作由国际电工委员会（IEC）TC21 技术委员会组织

进行。表6.8-3列出了我国生产的典型LSI电池产品的型　　号、尺寸和主要性能等参数。

表6.8-3（a）　　超越系列SLI铅酸电池产品系列（等效采用德国大众公司VW75073标准）

型　号	额定电压（V）	小时率容量（Ah）	冷起动电流（−18℃）	最大外形尺寸（mm）				适用车型
				长	宽	槽高	总高	
6−QW−50	12	50	255	242	175	190	190	Palio
6−QW−70a	12	70	340	278	175	190	190	奥迪专用/帕萨特/本田
6−QW−60a	12	60	280	242	175	190	190	桑塔纳/富康/欧宝/标致/绅宝/帕萨特B5
6−QW−60	12	60	280	242	175	190	190	桑塔纳/富康/欧宝/标致/绅宝/帕萨特B5
6−QW−63	12	63	300	290	175	175	175	桑塔纳/富康/欧宝/标致/绅宝/捷达
6−QW−54	12	54	265	290	175	175	175	桑塔纳/富康/欧宝/标致/绅宝/捷达

表6.8-3（b）　　超越系列SLI铅酸电池产品系列（等效采用法国雪铁龙公司PSAC75—2525标准）

型　号	额定电压（V）	小时率容量（Ah）	冷起动电流（−18℃）	最大外形尺寸（mm）				适用车型
				长	宽	槽高	总高	
L2400	12	60	400	242	175	190	190	桑塔纳/富康/欧宝/标致/绅宝/帕萨特B5

表6.8-3（c）　　超越系列SLI铅酸电池产品系列（等效采用日本JIS D5301标准）

型　号	额定电压（V）	小时率容量（Ah）	冷起动电流（−18℃）	最大外形尺寸（mm）				适用车型
				长	宽	槽高	总高	
6−QW−75	12	75	650	260	172	199	222	奇瑞东方之子
55D26R（L）	12	60	490	260	173	204	225	皮卡
6−QW−68	12	68	600	260	172	199	222	丰田/本田/日产/标致/凌志

表6.8-3（d）　　密闭免维护系列（产品符合Q/BD202）

型　号	额定电压（V）	小时率容量（Ah）	冷起动电流（−18℃）	最大外形尺寸（mm）				适用车型
				长	宽	槽高	总高	
56093	12	60	280	242	175	190	190	奥迪专用/帕萨特/本田
57069	12	70	340	278	175	190	190	帕萨特B5/富康/欧宝/标致/绅宝/富豪
58043	12	80	380	315	175	190	190	捷达柴油轿车
6−QW−70	12	70	340	278	175	190	190	奥迪专用/帕萨特/本田
6−QW−60a	12	60	280	242	175	190	190	帕萨特B5/富康/欧宝/标致/绅宝/富豪
6−QW−60	12	60	280	242	175	190	190	帕萨特B5/富康/欧宝/标致/绅宝/富豪

表6.8-3（e）　　密闭免维护系列

型　号	额定电压（V）	小时率容量（Ah）	冷起动电流（−18℃）	最大外形尺寸（mm）				适用车型
				长	宽	槽高	总高	
6−QW−63	12	63	300	290	175	175	175	捷达/奇瑞/桑塔纳/红旗
6−QW−90	12	90	380	305	173	198	222	新款红旗/中型货车/客车
6−QW−80	12	80	380	305	173	198	222	三菱吉普/凌志LS400/皇冠
6−QW−68	12	68	300	260	172	199	222	丰田/本田/日产/标志/三凌/三星面包/凌志SC30
6−QW−55	12	55	255	230	172	184	208	丰田/马自达/鸥宝/绅宝/富豪/日产/蓝鸟/本田/现代
6−QW−47	12	47	235	238	120	199	220	日产/丰田/马自达/现代/本田/松花江120W/蓝鸟
6−QW−45	12	45	433	238	128	202	220	长安之星/昌河面包
6−QW−36	12	36	235	238	120	199	220	日产/丰田/马自达/现代/本田/松花江120W/蓝鸟

表6.8-3（f）　　密闭免维护系列

型　号	额定电压（V）	小时率容量（Ah）	冷起动电流（−18℃）	最大外形尺寸（mm）				适用车型
				长	宽	槽高	总高	
96R−590	12	54	590	242	175	175	175	金通雪弗莱/北京切诺基
78−600	12	69	600	260	178	184	184	别克（BUICK）

表 6.8-3 (g) **密闭免维护系列**

型 号	额定电压 (V)	小时率容量 (Ah)	冷起动电流 (−18℃)	最大外形尺寸 (mm)				适 用 车 型
				长	宽	槽高	总高	
L2400	12	60	400	242	175	—	190	富康/BROA A4/POLO/捷达

表 6.8-3 (h) **密闭免维护系列**

型 号	额定电压 (V)	小时率容量 (Ah)	冷起动电流 (−18℃)	最大外形尺寸 (mm)				适 用 车 型
				长	宽	槽高	总高	
6—QW—54a	12	54	265	290	175	175	175	桑塔纳/富豪/欧宝/标致/绅宝

表 6.8-3 (i) **少 维 护 系 列**

型 号	额定电压 (V)	小时率容量 (Ah)	冷起动电流 (−18℃)	最大外形尺寸 (mm)				适 用 车 型
				长	宽	槽高	总高	
6—Q (A)—210	12	210	630	517	271	211	237	重卡/大巴
6—Q (A)—195	12	195	585	517	254	211	237	重卡
6—Q (A)—180	12	180	540	517	237	211	237	重卡
6—Q (A)—165	12	165	495	517	220	211	237	东风/解放/中卡/军车
6—Q (A)—150	12	150	450	517	203	211	237	东风/解放/中卡
6—Q (A)—135	12	135	435	517	186	211	237	东风/解放/中卡
6—Q (A)—120	12	120	420	517	186	211	237	东风/解放/中卡
6—Q (A)—105	12	105	368	444	174	205	228	东风/解放/中卡
6—Q (A)—90	12	90	315	396	174	211	234	中巴/客货
6—Q (A)—75	12	75	300	339	174	205	227	中巴/客货
6—Q (A)—60	12	60	240	288	173	203	226	中巴/客货
3—Q (A)—120	6	120	420	250	174	202	230	拖拉机农用车
3—Q (A)—150	6	150	450	324	167	212	252	拖拉机农用车
6—Q (A)—195	12	195	585	516	270	216	242	重卡
6—Q (A)—180	12	180	540	513	223	195	223	重卡

表 6.8-3 (j) **低 温 系 列**

型 号	额定电压 (V)	小时率容量 (Ah)	冷起动电流 (−18℃)	最大外形尺寸 (mm)				适 用 车 型
				长	宽	槽高	总高	
68025D	12	180	540	513	223	195	223	重卡
66514D	12	165	495	513	223	195	223	重卡
65012D	12	150	450	513	223	195	223	重卡
63530D	12	135	405	513	189	195	223	依维柯/中卡
62034D	12	120	360	513	189	195	223	客货/中卡
61017D	12	110	330	513	189	195	223	依维柯/中卡
6—QW—100DF	12	100	350	401	171	202	223	东风出国车
6—Q (A)—110D	12	110	330	435	170	201	220	东风/解放
6—Q (A)—100aD	12	100	350	410	170	202	226	江淮/瑞风/中巴/中卡
6—Q (A)—65D	12	65	195	264	170	195	226	中巴/中卡
6—Q (A)—60aD	12	60	240	256	165	202	222	胜利小客/长城与中兴皮卡

6　牵引型铅酸蓄电池

6.1　电池结构

牵引型电池属深循环使用的电池，最基本的要求是长循环寿命；其次是期望有高的体积比能量和低的成本。在电动叉车应用中，重量往往不是重要因素，因为往往需要用电池重量来维持有效载荷的平衡。

牵引型电池有两种结构设计，图 6.8-13 所示的是一个典型的涂膏式极板的牵引型电池。这种电池通常使用多一片负极板的设计（即 n 个正极板，$n+1$ 个负极板）。牵引电池通常被制造成单体电池组装的形式，由此当某个或某几个电池性能变化时，可以用很低的成本进行更换或修理。然而，目前世界上许多地方使用的大部分深循环电池仍然是管式或者排管式的正极板（图 6.8-14）。管式正极板具有最小的板栅腐蚀速度和活性物质脱落速度，因此具有更长的使用寿命，但是造价更高。由此大多采用涂膏式负极板与管式正极板一起使用，而且电池采用外侧负极的设计方案。

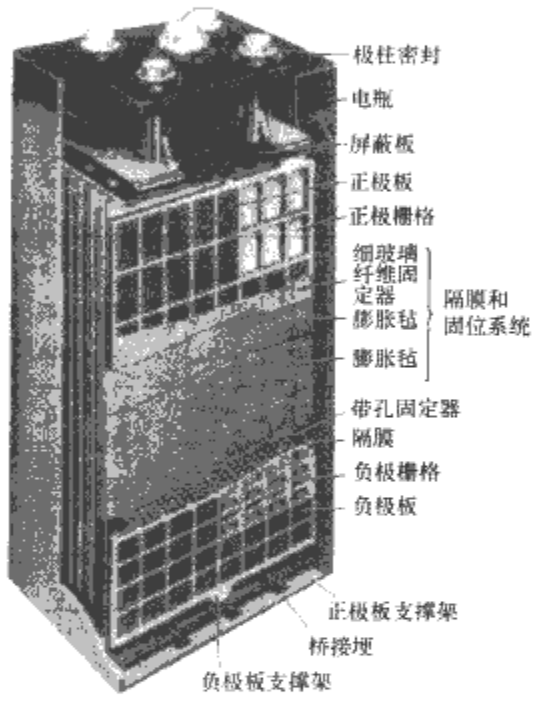


图 6.8-13　平板涂膏式牵引型电池

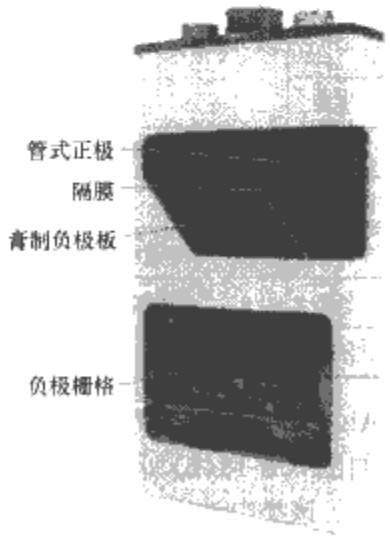


图 6.8-14　采用管式正极的牵引型酸电池

采用平板型涂膏电极的电池的寿命的改善主要通过采用高视密度铅膏的厚极板，高温、高湿固化，低电解质密度化成，优质的隔板，一层或者多层玻璃纤维毡（保持正极的活性物质）等来实现。这种电池主要的失效模式是正极活性物质的分解和板栅的腐蚀。

另外，对深循环用电池进行新的设计时，现在常常设计成用电解质的量控制容量，而不是由极板中的活性物质控制容量。这样做的目的是为了保护极板，从而使电池寿命得到延长。在使用过程中，正极和负极的性能都会衰退，但是在寿命的末期，主要还是正极衰减限制容量。评定电池的循环寿命时，一般选取低于初始容量或者额定容量的 60%～80%的时间，判断电池已经失效。

小型的牵引电池（例如高尔夫车电池）的设计介于大型牵引电池和 SLI 电池之间。对于道路电动车辆用电池，主要的评价标准包括高体积比能量，这样可以有最长的行驶里程。在这种电池中，则更多采用了 SLI 电池的设计理念，即采用很薄的极板和小的极板间距，以适合于高倍率放电，满足电动车辆推进速度的需求。有时电池在使用过程中会出现电解质分层的现象，现在已经设计出了各种各样的电解质混合装置来防止电解质分层，同时也可以用来增加电池的放电效率。

6.2　工作性能

两种牵引电池的典型放电曲线见图 6.8-15，该图表示电池输出容量与不同小时率的放电电流的关系曲线。由图可以看出，电池的容量是随着负载的增加和终止电压的升高而降低。

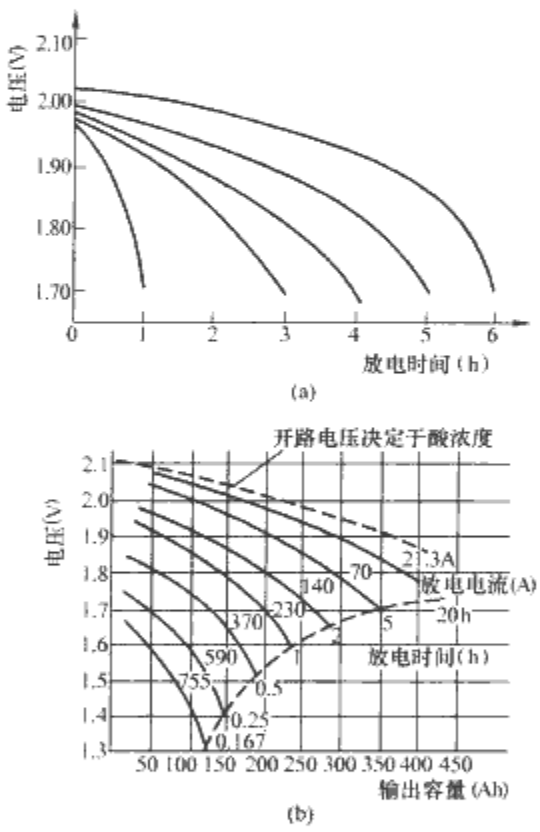


图 6.8-15　25℃下，牵引电池的放电特征
(a) 平板型涂膏电极电池；(b) 管状正极电池

牵引电池的循环寿命的定义是当电池容量降至额定容量的 80%循环次数。与其他蓄电池体系一样，电池的放电深度越深，它们的寿命越短。如果想得到预期的使用寿命，放电深度最好不要超过 80%。图 6.8-16 显示了各种放电率下的安全深度，在低放电率放电情况下，应该在更高的电压下终止放电，直到与 1.70V 线相交；在更高的放电率下放电时，可以放电到 1.70V/单格的终止电压。典型的循环寿命预期是 1500 个循环（约 6 年）。深循环电池可以作为起动电池使用，特别是在深度放电而且重复放电使用的情况下，这种电池的性能会更为优越。相反，SLI 型电池的深循环性能明显比牵引型电池差，如图 6.8-17 所示。这是因为 SLI 电池通常使用无锑铅合金，循环充放电可能导致板栅与活性物

质间阻挡层的生成，从而缩短循环寿命。

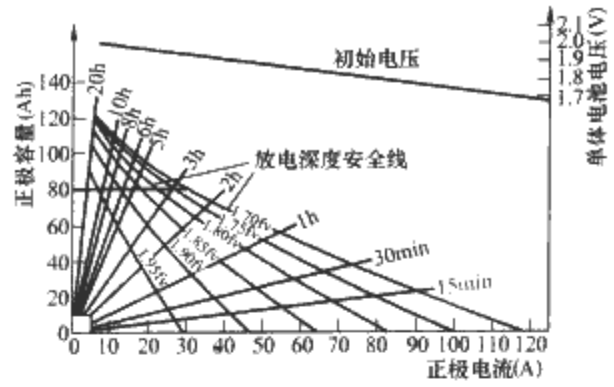


图 6.8-16 25℃下，平板状涂膏电极牵引电池放电至不同电压时的性能（100Ah、6h 率电池）

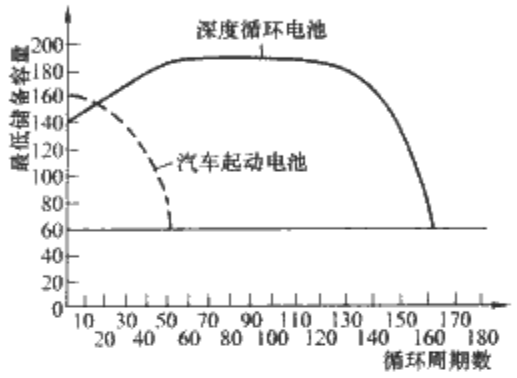


图 6.8-17 在低放电率下（25A，相同外形尺寸 SLI 电池与牵引电池深度循环时的循环寿命特性）

6.3 电池型号和尺寸

牵引或者动力电池具有许多不同的尺寸，这取决于电池仓的尺寸和对电性能要求。最基本的分等单位是正极板的容量，按照 5h 或者 6h 率容量的 Ah 数确定。典型的牵引电池通常使用 5～33 片极板组装成电池，电池的容量是由单个正极板的容量乘以正极板的数量得到的。相应的，电池单体被装配成各不相同的电池组，常见的是以 6V 为单位（如 6V、12V、18～96V），这样就造成了多达 1000 多种的电池组尺寸。常用的电池组尺寸是 6 单体的，每单体 11 片极板，5 片 75Ah 正极板（375Ah 单体）和 6 单体，13 片极板，6 片 85Ah 正极板（510Ah 单体）组成的电池组。

有几种尺寸的 SLI 电池设计已经用于深循环应用，特别是高型的，具有长度和宽度不同的 SLI 电池。其中的一些列在表 6.8-4 中。一种改进设计的叉车电池可用作为道路电动车辆用电池，如表 6.8-5 所列。表 6.8-6 列出我国典型的牵引型电池产品系列，供参考。

表 6.8-4 小型深循环电池

电压(V)	尺寸(mm) 长	宽	高	额定值	典型操作电流(A)	应用
12	197	197	186	30～35Ah，20h 率	25	拖动
12	260	173	225	75～90Ah，20h 率	25	摩托
12	306	173	22[illegible]	95～105Ah，20h 率	25	轮椅
6	264	183	260	75min，75A 放电	75	高尔夫车电动车
6	264	183	160	95～90min，75A 放电	300	
6	264	183	260	100～100min，75A 放电	300	
12	261	181	279	105Ah，20h 率	150	
6	295	178	276	200～230Ah，20h 率	50～75	地面维护机器
12	241	166	239	50～70Ah，20h 率	50～75	
12	518	276	445	350～400Ah，20h 率	30～50	矿车

表 6.8-5 典型电动车（EV）电池

电压(V)	每个电池极板数	最大整体尺寸(mm) 长	宽	高	质量(kg)	2h 率容量(Ah)	3h 率容量(Ah)	75A 放电时间(min)	3h 率放电比能量(Wh/kg)
12	54	197	132	186	9.5	20	33	15	26
12	78	260	173	225	22	55	59	39	31
6	57	264	183	270	26	126	135	100	29
12	90	306	173	225	24	62	68	45	32
6	57	264	183	270	30	150	171	120	33
6	39	264	183	280	27	158	174	140	37

表 6.8-6 我国的典型电动车用铅酸电池产品系列

型 号	额定电压(V)	小时率容量(Ah)	冷起动电流(－18℃)	最大外形尺寸(mm) 长	宽	槽高	总高	适用车型
3－D－210	6	5hr/210Ah	420	264	181	262.5	306	电动游览车、高尔夫球车等
6－DM－38	12	38	—	198	165	—	175	—
6－DM－55	12	3hr/55Ah	55	388	116	156	175	电动轿车、游览车专用
3－DA－180a	6	5hr/180Ah	360	265	180	249	292	高尔夫球车、游览车专用
6－DA－150	12	5hr/150Ah	300	453	180	246	265	高尔夫球车、游览车专用

7 固定型铅酸蓄电池

7.1 电池结构

固定型铅酸蓄电池有两种电极结构形式，如正负极均为涂膏式极板的 4V 和 6V 的电池组，容量大约为 250Ah，可达到的容量为 18～256Ah，极板容量一般设计为 18 和 32Ah；壳体为聚丙烯(PP)半透明电池壳，如图 6.8-18(a)所示；负极为涂膏式极板、正极为管式极板的 6V 电池组，可达到的容量为 150～12 000Ah；极板容量设计为 50、70、100、125 及 250Ah；2000Ah 及以下的电池壳采用苯乙烯—丙烯腈共聚物，如图 6.8-18(b)所示。大于 3000Ah 的电池采用硬橡胶电池壳。该类电池适用于长期小电流至中等电流放电，并显示长的循环寿命。

固定型铅酸蓄电池大多用作备用状态，对这种电池设计的放电率要远低于 SLI 型和牵引型电池。在要求备用电池寿命要长的多的情况下，这是必须的。因此通常使用重而厚的极板，并用高视密度铅膏制作的极板。固化非常重要，涂膏式极板通常要非常小心的干燥以免产生裂纹和板栅与活性物质间的界面变坏。

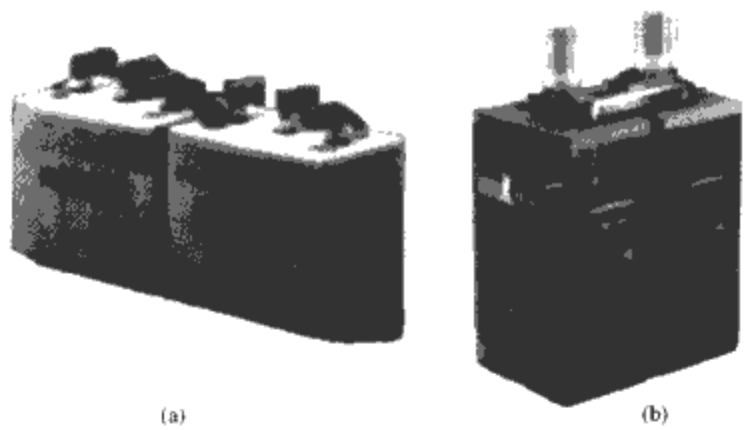


图 6.8-18　典型的固定型电池
(a) 涂膏式正负极电池；(b) 涂膏式负极、管式正极电池

固定型电池具有过量的电解质设计（高度富液）以便达到最小的维护量和最少的加水次数，并且这种电池的容量是正极板控制的（与牵引型电池相比，牵引型电池是电解质控制或者酸控制）。固定型电池能够浮充电或者中等程度过充电。由于采用厚极板设计，显然对这种电池没有高体积比能量和高比功率的特别要求；但要求能耐过充电的条件，则必需要有大的电解质体积（通常是电池被安装到固定位置后再灌入电解质），并且通常使用无锑合金板栅（使加水的间隔最大化）。过充电往往会导致正极板栅的腐蚀，引起极板的增长或者膨胀，因此要在正极板到电池槽内壁留出空隙，以便为极板 10%膨胀留出空间。如果极板的增长程度超过 10%，则其上的活性物质已经太松了。由于电池容量是由正极板限制的，此时必须对这些电池进行更换。

一些固定型电池设计成作循环使用的电池，而不是浮充使用的类型。此时采用牵引电池的设计原则是适用的。循环用固定型电池的主要用途包括电网负荷平衡和太阳电池光伏能量储存系统等。

7.2　工作性能

图 6.8-19 显示出涂膏极板的固定型铅酸蓄电池的典型放电性能，由图可以看出通常固定型电池的放电率定义为小时率（即电池在规定的时间内放完电所采用的电流，A），而不是其他类型蓄电池所应用的 C 倍率。

显然，固定型电池尽管允许在－40℃～50℃环境下工作，但其最佳使用温度是 20～30℃。温度对固定型电池在不同负载下容量的影响见图 6.8-20 。更高的温度则会增加自放电，缩短循环寿命，并且还可能带来其他的不好影响。

在 25℃条件下，对于满荷电的铅钙合金电池正极板的自放电大约为每月 1%，而对于铅锑合金正极板电池为每月 7%～15%。在更高的温度条件下，自放电显著增加，温度每增高 10℃自放电速度就加倍。由于固定型铅酸蓄电池大

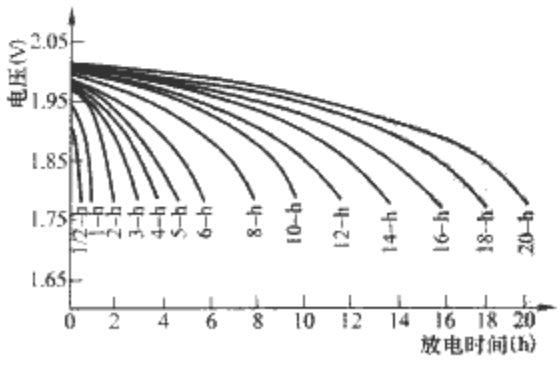


图 6.8-19　涂膏极板的固定型铅酸电池以不同小时率放电的典型放电曲线

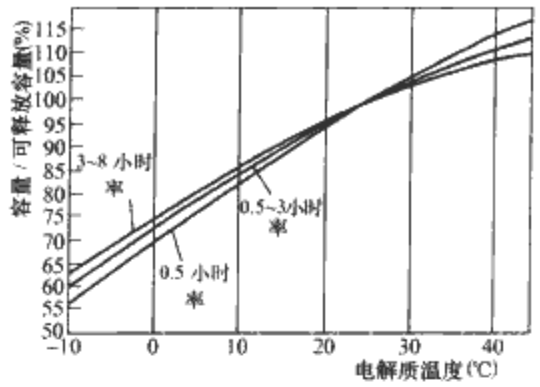


图6.8-20　在不同温度和放电小时率下，板状涂膏电极铅酸电池的性能

多用于备用，因此电池也多处于浮充电条件下。如图 6.8-21 所示，对于采用铅钙合金的电池需要叠加高于 50mV 的正过电位和负过电位来防止电池的自放电，所以每 100Ah 电池需要 0.005A 的浮充电流来充电。而铅锑合金板栅电池的初始浮充电每 100Ah 最少需要 0.06A，当电池老化以后则要每 100Ah 增加到 0.6A。较高的浮充电电流增加了水的损失和氢气的析出。

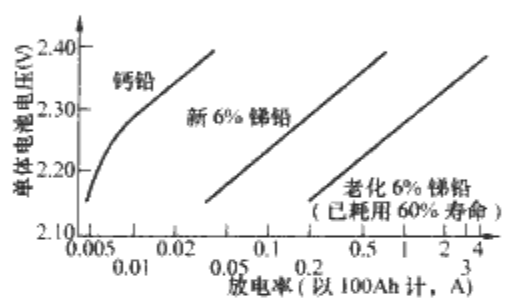


图 6.8-21　25℃下、充满电的 100Ah 固定型铅酸电池的浮充电特性（电解质密度 1.210）

通常情况下，涂膏式铅锑合金电池具有最短的寿命（5～18 年），然后是铅钙合金涂膏式极板电池（15～25 年），管式极板电池（20～25 年）和普兰特式极板电池（25 年）。

7.3　电池及电池组型号和尺寸

固定型电池如同牵引电池一样，采用各种不同的极板和具有各种电池尺寸。固定型电池系统一般是将串联的电池组安装在绝缘的电池架上组装而成的，标称电压在 12～160V 之间。同时为获得更大的容量，也可以将这样的串联电池组再并联起来使用。表 6.8-7 和表 6.8-8 列出了几种国产固定型铅酸电池的型号、尺寸和性能。

表 6.8-7　国产通信用铅酸蓄电池的型号、尺寸和性能

型号	额定电压 (V)	小时率容量 (Ah)	最大外形尺寸 (mm)			
			长	宽	槽高	总高
MSE300	2	10hr/300；1hr/195	171	150	330	365
MSE200	2	10hr/200；1hr/130	171	107	330	365
MSE3000	2	10hr/3000；1hr/1950	696	340	340	372
MSE2000	2	10hr/2000；1hr/1300	474	337	340	372
MSE1000	2	10hr/1000；1hr/650	472	172	330	355

续表

型号	额定电压（V）	小时率容量（Ah）	最大外形尺寸（mm）			
			长	宽	槽高	总高
MSE800	2	10hr/800；1hr/520	410	175	330	360
MSE600	2	10hr/600；1hr/390	301	175	330	360
MSE500	2	10hr/500；1hr/325	241	171	330	355

表 6.8-8 国产电力系统用铅酸蓄电池的型号、尺寸和性能

型号	额定电压（V）	小时率容量（Ah）	最大外形尺寸（mm）			
			长	宽	槽高	总高
MSE3000	2	10hr/3000；1hr/1950	696	340	340	372
MSE2000	2	10hr/2000；1hr/1300	474	337	340	372
MSE1000	2	10hr/1000；1hr/650	472	172	330	355
MSE800	2	10hr/800；1hr/520	410	175	330	360
MSE600	2	10hr/600；1hr/390	301	175	330	360
MSE500	2	10hr/500；1hr/325	241	171	330	355
MSE300	2	10hr/300；1hr/195	171	150	330	365
MSE200	2	10hr/200；1hr/130	171	107	330	365

8 阀控式铅酸蓄电池

1859 年法国科学家普兰特（G. Plante）成功地试制出世界上第一只铅酸蓄电池，在随后的一个多世纪中铅酸蓄电池行业得到了迅猛发展。随着新技术、新工艺的不断涌现，电池的质量和制造水平日益提高，市场范围不断拓展。尽管铅酸蓄电池的重量比能量、体积比能量无法与镍镉、镍金属氢化物、锂离子、锂聚合物等电池相提并论，但它优秀的性能价格比仍使它在二次电池中占据主导地位。特别是 20 世纪 80 年代以后开发出的以铅钙合金作板栅，以超细玻璃纤维作隔膜的阴极吸收式密封铅酸蓄电池以及采用胶体电解质的密封铅酸蓄电池，使铅酸蓄电池技术有了一次突破性发展。由于在这类电池中使用了阀控式结构，故在正式出版物中称其为阀控式铅酸蓄电池。

密封铅酸蓄电池为荷电出厂，无流动电解液，可随意放置，使用中不需加水、加酸，并且充电时无酸雾逸出，避免了对设备的腐蚀和对环境的污染。因此刚问世就受到用户的极大青睐。而随着技术上的更加成熟，产品质量的更加可靠，这类产品便占领了更广阔的市场。其中小型便携式铅酸电池取代了部分碱性电池和干电池的市场。而大型电池替代了原先的开口电池，进入了固定型电池应用市场，1999 年世界通信和 UPS 应用市场中使用阀控式铅酸电池就已经超过了 75%。

随着我国经济的持续快速增长，数字化、信息化时代的来临，我国的邮电通信、计算机系统、网络系统、广播电视等信息产业取得了日新月异的发展，这对作为固定型电池应用的密封铅酸蓄电池的需求则越来越多。同时近年来我国电动自行车产业发展异常迅猛，其中 90%采用了小型密封铅酸蓄电池。由此都极大地促进了我国铅酸蓄电池尤其是密封铅酸蓄电池行业的发展。

8.1 工作原理与分类

阀控式密封铅酸电池工作时发生的基本化学反应和开口式铅酸电池是相同的，其正常工作过程中的充放电反应原理如下式所示

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} 2PbSO_4 + 2H_2O$$

当给电池充电时，细微分布的硫酸铅粒子在负极上被电化学转换成海绵状铅，而在正极上则转化成 PbO_2。当充电接近完成且大部分 $PbSO_4$ 已经被转化成 Pb 和 PbO_2 时，过充电反应就会开始。对传统的富液式铅酸电池而言，过充电时的反应就会导致氢气和氧气的生成，并通过逸出电池外造成水的永久性损失。

那么如何实现电池可以进行密封设计的条件以及采用何种密封性是保证电池的正常工作和安全要求呢？最后通过原理研究，找到了解决减少析出气体和能使氧气复合的措施；并设计出即可在正常工作时电池是密封的，而一旦内压过高能够释放内压的机构。由此便得到了与密封镉/镍蓄电池具有相似工作原理的密封铅酸电池。其工作原理为：

（1）采用了非锑合金板栅（如纯铅、铅钙合金和低锑和金），提高了析氢过电位；同时采用负极过量设计，将氢气的产生降至最低；

（2）在电池内部采用可实现氧从正极向负极的迁移，并在其上进行的复合反应的措施。在有 H_2SO_4 存在的条件下，氧气可以进行如下的“氧复合”的化学反应

$$Pb + HSO_4^- + 1/2O_2 \longrightarrow PbSO_4 + H_2O$$

这一反应的速度受到氧气扩散到负极海绵状活性铅表面的速度所控制，一般，在富液的铅酸蓄电池中这种气体扩散是一个极其缓慢的过程，以至于几乎所有的 H_2 和 O_2 都从电池逸出而不是复合。但是在设计密封电池时采用了超细玻璃纤维组成的多孔隔膜和与电极群的紧密装配，所有电解质都吸收在隔膜与电极中，电池中无游离电解质液体，形成了所谓“贫电解质”状态。在这种情况下，有利于氧气的扩散过程，加速了其在负极上的复合速度；事实上，在处于继续充电的状态下，上述反应式中的 $PbSO_4$ 又可进一步转化成 Pb。因此在密封电池中形成了氧循环过程，也可以用一组电化学反应图像来加以描述，如图 6.8-22 所示。

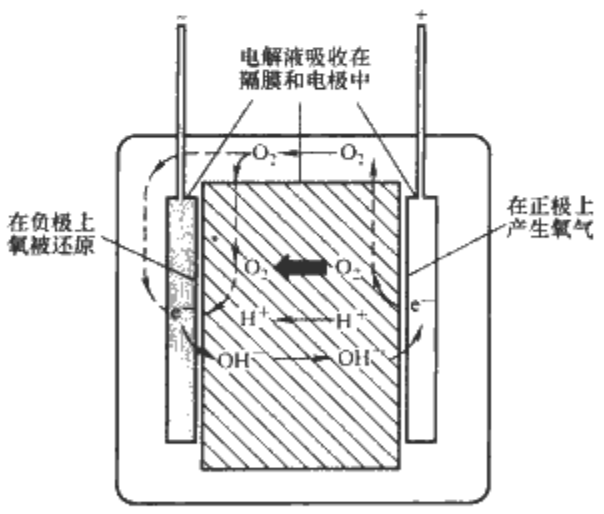


图 6.8-22 在阀控式蓄电池中氧循环过程示意图

负极反应

$$O_2 + 2H^+ + 4e^- \rightarrow 2OH^-$$

正极反应

$$2OH^- \rightarrow O_2 + 2H^+ + 4e^-$$

（3）采用了阀控式结构，既保持电池在正常工作过程处

于完好密封状态，但又允许电池内一旦积累了过高的内压能够释放，并阻止液体泄漏。同时这个阀（如一个橡胶帽）可以使外界气体不能进入电池内部。由此在铅酸蓄电池领域实现了一个新的电池系列“密封铅酸蓄电池”系列，并由于在这类电池中使用了阀控式结构，故在正式出版物中称其为阀控式铅酸蓄电池（VRLA 或 Valve Regulated Lead Acid）。

当今，商品市场上的全部小型便携式电池和大部分大型固定型电池系列产品都采用了阀控式结构，因此它们是密封和免维护的。免维护就意味着在蓄电池的整个寿命期间不需添加水。

按照上述工作原理设计的阀控式蓄电池必须采用不同的充电模式，即采用恒电流和恒电压模式进行充电与控制。在这样的充电模式下，电池不会在充电后期遇到过大的充电电流，因此也不会发生气体产生过快，使控制阀急速排气造成电池内部水的严重流失问题。同样在恒电流充电阶段也不期望电流过大。

目前阀控式铅酸电池从电解质固定方式不同，可以有“吸附式”和“胶体式”两类。吸附式电池即是常见的电解质固定在玻璃纤维隔膜中的电池；而胶体式电池则是电解质固定在胶体中的电池，又俗称胶体电解质电池或胶体电池。

8.2 电池结构

8.2.1 圆柱状阀控式电池

一个典型的圆柱形阀控式电池的横截面图表示于图 6.8-23 中。正极和负极板栅均采用纯铅（99.99%）中加入 0.6%锡而制成，以提高电池深放电下的恢复能力。一般板栅厚度相对较薄（0.6~0.9mm），以便使电池中有较高的极板（总）表面积，满足高放电率性能要求。极板涂上铅膏，用玻璃纤维隔膜隔开，卷绕成电极组件。然后，将铅极柱分别焊接到露在正极和负极板栅上方的极耳上。再将接线端穿过聚丙烯内盖插入铅极柱，并利用其自身的膨胀有效地与铅极柱形成紧密一体化结构。然后装入外壳（衬垫），且使塑料顶盖与塑料外壳焊接连接在一起。在这种结构状态下，除了敞开的气孔外，其余部分已全部密封。随后加入硫酸，在排气孔上扣上一个安全阀。下一步，将封好的电池放入一个金属外壳，盖上最外面的塑料盖，滚槽后便完成了整个电池装配。金属外壳增加了壳体的机械强度，且不影响安全阀的作用。电池装配完成后，对每个电池进行单个化成。

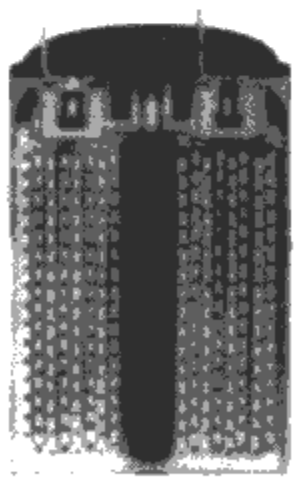


图 6.8-23 一个典型的圆柱形阀控式电池截面图

8.2.2 方形阀控式电池

一个典型的商品方形阀控式铅酸电池组结构的分解示意图表示于图 6.8-24 中。方形电池通常使用无锑的铅钙合金板栅，显示的自放电更低，而且有助于减少氢气逸出。然而，这种设计会降低电池的深循环寿命。由此必须通过加入合适添加剂来加以改进，其中已经公布的便是磷酸。这种电池的循环性能、容量和浮充寿命之间的平衡是由 α-PbO_2 和 β-PbO_2 的比例、铅膏视密度、电解质量及浓度、合金组成、添加剂种类和量等因素所控制的。

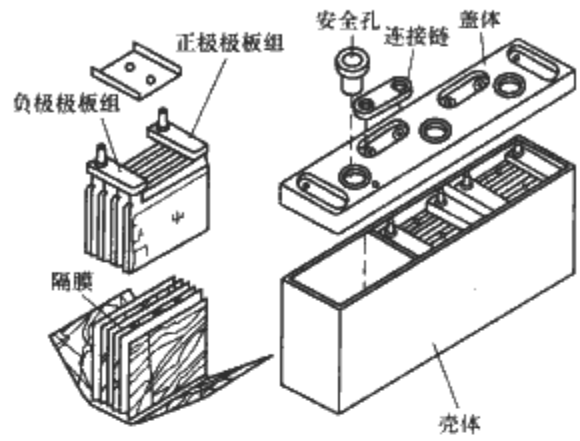


图 6.8-24 典型的商品方形阀控式铅酸电池组分解图

电解质的固定方式可以采用高吸收性的玻璃纤维隔膜，或者采用凝固成胶体的方式，目前最常用的凝胶化材料是气相硅。应用凝胶法生产胶体电池时，极板通常先在化成槽中用稀硫酸化成，这是两步化成过程的第一步。凝胶化过程是在电池装配的最后一步进行。

8.3 工作性能

一个阀控式单体电池的额定电压是 2.0V，典型的放电终止电压一般取 1.75V。同样对一个阀控式铅酸电池，也可以通过测量开路电压判断电池的荷电状态，如图 6.8-25 所示。这乃是基于开路电压（OCV）与电池中硫酸溶液的密度之间的关系，而硫酸的浓度值和相应的密度值是随着放电过程中硫酸的消耗和水的生成而降低。方形阀控式铅酸电池在 20℃条件下典型的放电曲线如图 6.8-26 所示，由图可以看出该类型电池具有高放电率能力和显示平坦的放电曲线。

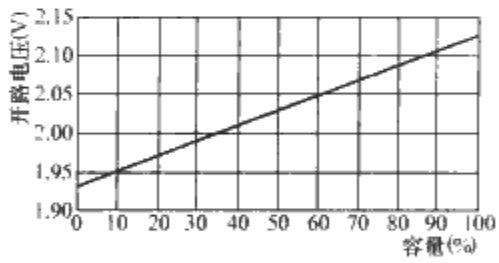


图 6.8-25 开路电压与荷电状态

阀控式电池通常也按 20h 率或 0.05C 率来标称其容量，该图上绘出的是以 $C/20$ 率倍数的放电电流和不同终止电压下的放电曲线。例如，一个电池的 20h 率的容量为 5Ah，那

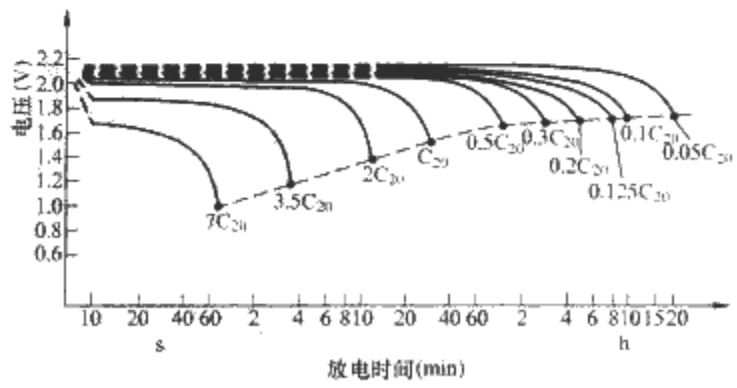


图 6.8-26 20℃下以 20h 率的倍数放电时，方形阀控式铅酸电池的典型放电曲线

么电池的 $C/20/5$ 率为

$$\frac{C/20}{5}=0.2C/20=(0.2)(5)=1\text{A}$$

由此可知，$C/20/5$ 放电率的电流为 1.0A。$C/20$ 的放电率则为 0.25A。

由于典型的卷绕式圆柱形阀控式电池的电极较薄、一般具有更大的面积，因此使其显示出良好的放电能力和温度特性。图 6.8-27 给出了 25℃时 2.5Ah 圆柱形电池的一组放电曲线，该曲线显示出该类电池甚至可以在比方形电池更高的放电率条件下工作（最高达到 12C/20），且保持很好的电压特性。

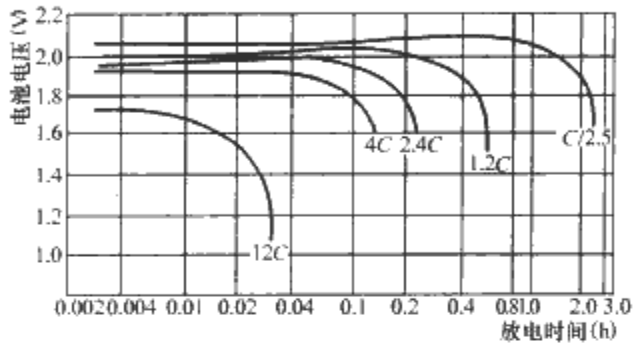


图 6.8-27 25℃下，圆柱形阀控式 D 和 X 电池以高放电率放电的曲线

这类电池可在一段非常宽的温度范围内使用，如图 6.8-28所示。图上表示出这种电池在－40℃～65℃之间温度范围内，以不同放电率放电的典型放电曲线。显然在各种温度下，以中等放电率或低放电率时的放电电压都相当平稳，这些曲线是由 2.5Ah 和 5Ah 圆柱形电池取得的。

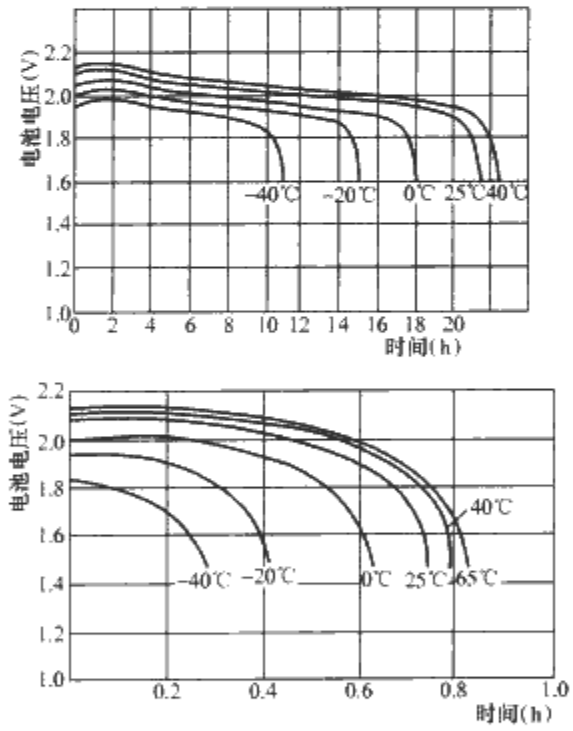


图 6.8-28 圆柱形阀控式电池在不同温度下的典型放电曲线，（左）$C/20$ 率；（右）1C 率

阀控式铅酸电池一般具有良好的贮存特性，因此作为小型便携式电池，可以在充电后的相当长时间内方便使用。图 6.8-29 表示出这类电池的典型贮存特性。

由图 6.8-29 可以看出电池在室温下贮存 1 年还可保持初始容量的 60%左右。但相其他电池一样，随着贮存温度升高时自放电显著升高，容量保持率相应下降。尽管如此，这种电池在 40℃下贮存 3 个月时还可保持接近初始容量的 70%，这显著优于密封镉镍电池，更优于密封金属氢化物镍电池。

综合考虑，一般推荐的方形阀控式铅酸电池的操作及贮

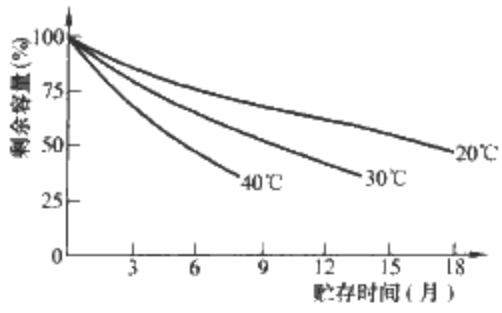


图 6.8-29 方形阀控式铅酸电池在不同温度下的典型贮存特性

存温度范围为：放电为－15℃～50℃；充电为 0℃～40℃；贮存为－15℃～40℃。同时可以推荐给用户采用测量电池电压的方法，用以判断阀控式单体电池和方形整体电池组贮存后的荷电状态或剩余容量。

阀控式电池作为深度循环条件使用时（例如用作电动自行车或电动工具的电源），其循环寿命是一个重要指标。图 6.8-30 和图 6.8-31 分别表示出放电深度（DOD）对方形与圆柱形阀控式电池循环寿命的典型影响，在 100%DOD 时，电池的典型循环寿命都是 200 次左右。由此说明在应用上，应当通过选择较大一些容量的电池来降低放电深度，以便可以获得更长的循环寿命。图6.8-32是一条容量随循环次数变化的曲线，一只 2.5Ah 电池（5h 率为 2.35Ah）以 $C/5$ 的放电倍率每天循环一次到 1.6V，然后恒压充电 18h 至 2.5V。电池使用 20～25 次循环达到或超过额定容量，然后容量开始缓慢下降。最初容量的上升是阀控式电池的一个典型特点，一般认为这是电池逐步完成化成的一种状况。

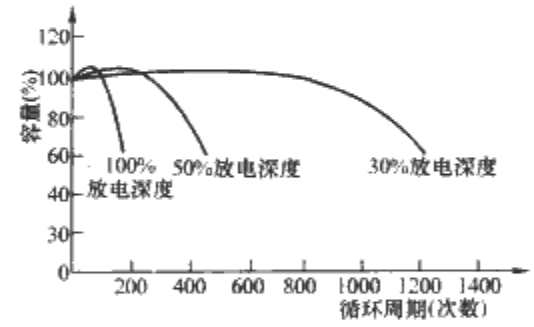


图 6.8-30 20℃时方形铅酸电池的寿命与放电深度的关系

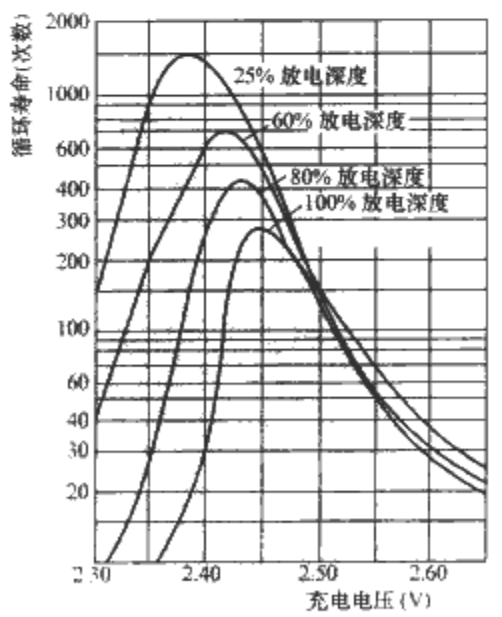


图 6.8-31 在 25℃下，不同放电深度、充电电压对容量圆柱形阀控式电池循环寿命的影响

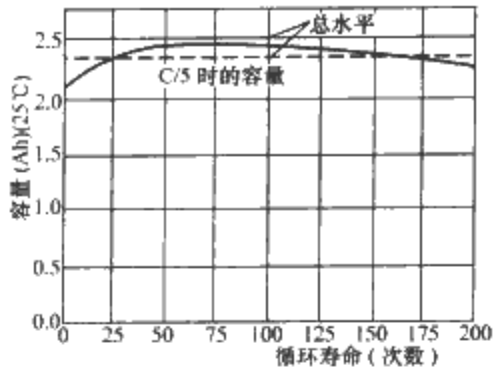


图 6.8-32 阀控式电池以 C/5 倍率放电时电池随循环周期的变化（循环条件：1 循环周期/天为 1 次）

8.4 电池型号和尺寸

表 6.8-9、表 6.8-10 和表 6.8-11 分别列出了当今商品阀控式电池的一些代表性型号、尺寸和特性。

表 6.8-9 圆柱形阀控式铅酸电池的型号、尺寸和特性

型号	容量（Ah）			尺寸（mm）		质量（典型）(g)	比能量 (C/20) (Wh/kg)	最大放电电流 (A)
	C/10 放电率	C/20 放电率	1C 放电率	高	直径			
D	2.5	2.7	1.8	67.3	34.3	180	30.0	40
X	5.0	5.4	3.2	80.3	49.5	390	27.6	40
J	12.5	13.0	9.0	135.7	51.8	840	30.8	60
BC	25.0	26.0	17.5	172.3	65.3	1580	32.9	250
DT	4.5	4.8	3.7	102.9	34.3	272	35.3	40
E	8.1	8.4	6.2	108.7	44.5	549	30.6	40

表 6.8-10 国产典型的方形阀控式铅酸电池的型号、尺寸和特性

型号	额定电压 (V)	额定容量 10h 率（Ah）	外形尺寸 (mm)				质量 (kg)
			长	宽	高	总高	
FM100	2	100	72	170	330	365	9
FM200	2	200	107	170	330	365	16
FM300	2	300	151	170	330	365	22
FM400	2	400	205	175	330	365	30
FM500	2	500	241	170	330	365	37
FM600	2	600	300	175	330	365	43
FM800	2	800	410	175	330	365	60
FM1000	2	1000	480	175	330	365	71
FM1500	2	1500	400	350	340	375	110
FM2000	2	2000	490	350	340	380	146
FM3000	2	3000	710	350	340	385	220
3FM4.5	6	4.5	70	48	108	108	0.9
3FM8	6	8	151	50	95	100	2.1
3FM10	6	10	151	50	95	101	2.1
6FM7	12	7	151	65	94	101	2.55
6FM24	12	24	166	125	175	175	9.1
6FM40	12	40	197	166	170	170	16
6FM50	12	50	259	133	203	203	18
6FM60	12	60	243	205	198	216	21
6TM60	12	60	265	190	220	220	26
6FM65	12	65	350	166	174	174	27

续表

型号	额定电压 (V)	额定容量 10h 率（Ah）	外形尺寸 (mm)				质量 (kg)
			长	宽	高	总高	
6FM70	12	70	260	168	208	227	25
6FM80	12	80	306	168	208	227	29
6FM90	12	90	331	173	224	252	36
6FM100	12	100	331	173	224	252	36
6FM120	12	120	405	172	210	238	41
6FM150	12	150	484	172	242	242	53
6FM200	12	200	520	240	225	260	75

注 表中的阀控式电池覆盖了以下应用范畴：

起动型（代码 Q）：3FM4.5、6FM12、6FM60、6FM100、6FM150、…固定型（代码 G）：FM200、FM300、FM400、FM500、FM800、FM1000、FM1500、FM2000、FM3000、…

电动车用或者动力型（代码 D）：6FM100、6FM150——用于电动汽车；

内燃机车（代码 N）：FM500、6FM60、…

铁路客车（代码 T）：6FM60

摩托车用（代码 M）：3FM4、6FM12、…

矿灯酸性（代码 KS）：3FM4；

舰船用（代码 JC）：FM200、6FM100；

风力储能（代码 F）：FM200、FM300、FM400、FM500、FM800、FM1000、…

UPS 用：6FM7、3FM4、…

表 6.8-11 国产电动车及电动助力车用典型的方形阀控式铅酸电池的型号、尺寸和特性

型 号	额定电压 (V)	额定容量（Ah）			外形尺寸（mm）				参考重量 (kg)
		2hr	5hr	10hr	长	宽	高	总高	
3-DZM-10	6	10	—	—	151±2	49±2	94±2	101	2.1
6-DZM-7	12	7	—	—	151±2	65±2	94±2	101	2.7
6-DZM-10	12	10	—	—	151±2	98±2	94±2	101	4.2
6-DZM-12	12	—	12	—	151±2	98±2	94±2	101	4.3
6-DZM-14	12	—	14	—	151±2	98±2	97±2	104	4.4
6-DZM-16	12	14	16	—	151±2	98±2	116±2	123	5.4
6-DZM-17	12	14	17	20	183±3	77±2	163±2	176	6.5
6-DZM-20	12	—	20	24	181±3	77±2	170±2	172	7.2

9 维护与安全运行

9.1 工业开口型铅酸电池维护

工业开口型铅酸电池使用 10 年以上是很普遍的，而正确地使用与维护对确保电池的使用寿命是必要的。基本的使用规则是：

（1）按照电池的充电要求配置充电器。

（2）阻止过放电。

（3）将电解质液面维持在适当的水平（需要时添加水）。

（4）保持电池清洁。

（5）避免电池过热。

除此以外，由于电池组是由单体电池串联而成的，应对电池组进行定期平衡。

遵循上述原则，除应选好充电器、确定适当的充电电压和控制措施，确保在适当的时候能够终止充电以及防止过放电外，对于开口电池的维护应该做以下事宜：

（1）定期检查电池的电压（特别是浮充状态下的电压）包括总电压/分电压其中总电压（电池外部端柱处）应为2.23V/电体乘以单体电池数（在+10℃～+30℃之间）平均值在2.20～2.25V/单体都是允许的，但最好应为2.23V/单体）在2.23V/单体浮充条件下的允许偏差U（最大）=2.33V U（最小）=2.18V（即对单个单体为2.23+0.1V/单体−0.05V/单体）。若单体电池电压太低，且用均衡充电的方法也不能提高，不平衡的状况是不希望发生的，因为随着时间的推移，会发生这些电池的快速的老化。因此应该考虑更换。

（2）定期检查电解质的密度，并且按照表6.8-12和表6.8-13将其调整到规定值。

表6.8-12　　硫酸溶液的性质

密度		温度系数 α	H_2SO_4 水溶液浓度			凝固点（℃）	电化学当量（每升酸）（Ah）
15℃	25℃		质量分数（%）	体积分数（%）	摩尔浓度（mol/L）		
1.00	1.000	—	0	0	0	0	0
1.05	1.049	33	7.3	4.2	0.82	—	22
1.10	1.097	48	14.3	8.5	1.65	7～7.7	44
1.15	1.146	60	20.9	13.0	2.51	−15	67
1.20	1.196	68	27.2	17.7	3.39	−27	90
1.25	1.245	72	33.2	22.6	4.31	−52	115
1.30	1.295	75	39.1	27.6	5.26	−70	141
1.35	1.345	77	44.7	32.8	6.23	−49	167
1.40	1.395	79	50.0	38	7.21	−36	
1.45	1.445	82	55.0	43.3	8.2	−29	
1.50	1.495	85	59.7	48.7	9.2	−29	

表6.8-13　　在25℃、满荷电状态下电解质的密度

电池类型	密度	
	温带气候	热带气候
SLI	1.260～1.290	1.210～1.230
高负荷型	1.260～1.290	1.210～1.230
高尔夫车	1.260～1.290	1.210～1.230
高尔夫车（电动车辆）	1.275～1.325	1.240～1.275
牵引电池	1.275～1.325	1.240～1.275
备用电池	1.210～1.225	1.200～1.220
内燃机起动（铁路）	1.250	
航空	1.260～1.285	1.260～1.285

注　对于计算任何温度下的电解质密度（℃），d（T）$=d$（15℃）$+\alpha\times10^{-3}$。

（3）检查电解质水平。实际上在正常操作条件下，由于蒸发和电解分解成氢气和氧气逸出，而造成的水损失并不是太大的。但由于过充电发生，则每过充电1Ah，会损失0.336mL水。一只500Ah电池过充电10%则造成16.8mL水损失，或者每循环一次造成0.3%的水损失。因此必须定期的检查电解质水平，即检查水损耗。这种检查也是对充电效率的粗略评估，据此可以作为调整充电器的提示（通过调整降低过充电程度，使水损失降低，降低补水成本）。

一般添加水最好在充电后或平衡充电以前，这是因为充电即将结束的时候将水加到酸液中，充电过程中产生的气体会将水均匀的搅拌到酸中。在寒冷的环境下，应该在有搅拌的情况下加水，因为加入的水会在析气发生以前结冰。加入的水必须是蒸馏水、去离子水或者经过证实适合电池使用的本地水。在加入水后，必须检查电解质的密度，以确保充电态电池的正常电解质浓度。一个有用的近似公式是：电解液密度=电池开路电压数值−0.845。

尽管大部分的电池制造商已经不再对蒸馏水的要求做详细说明，但是采用矿物质含量和重金属离子（如铁）含量低的高品质水，有助于延长电池的使用寿命。

（4）经常保持电池的整洁度。保持电池清洁能够将端子连接处、电池架的腐蚀降到最低，避免了价格高昂的维修工作。电池上通常会落有干的灰尘，可以用风吹掉或者用刷子刷掉的方法处理。这些污物应该在被潮气变成导体之前被清除。这是因为电池的上表面很容易被从电池中溢出的电解质润湿。电解质中的酸不会蒸发，可以通过苏打水溶液和热水清洗电池的方法将其中和。苏打水溶液用大约1kg的苏打用4L水溶解来配制。在用苏打水洗过之后这些区域应该用水彻底冲洗。

（5）电池平衡。在循环过程中，由很多单体串联而成的高电压电池组中的电池之间可能变得不平衡，电池组中存在某个或某几个电池限制了整组电池的充放电。这些电池常常具有更高的过充电，更多的水损耗，因此需要更多的维护。采取均衡充电模式可以有利于电池间的均衡。具体做法是在正常充电率充电结束后，对电池延长充电时间3～6h，充电倍率大约每100Ah（5h率容量计）为5A，在这个过程中，允许电池的电压无控制的升高。均衡充电应该持续到电池电压和电解质密度升高到一个稳定的可接受值。均衡充电的频率通常是电池累计放电量的函数，通常针对每种电池所应用的均衡充电方法，电池制造商都会作出详细的说明。

9.2　备用阀孔式密封铅酸电池使用中的注意事项

虽然阀孔式密封铅酸电池是免维护电池，但作为备用时，也需要进行必要的检测与控制以及对个别较早失效电池进行及时发现与更换，以延长整套电池组的使用寿命。

9.2.1　温度测量与控制

测量电池所在房间的温度和电池的环境温度。如果安装在电池柜中，在测量时应该保持柜门紧闭；测量单体电池或整体电池的表面温度，应该总是在同一点测量（负极极柱或外壳，其中负极极柱是最大的散热点）；环境温度的差异大于3℃可能影响电池的工作。在相邻单体电池或整体电池之间表面温度的差异大于5℃可能是电池工作不正常的征兆（热失控的开始）。

9.2.2　电池的目视观察

发现电解液出现在极柱或电池盖附近，表明电池生产上的问题或在运输中发生损坏，例如，产生裂纹，则电池必须更换；在控制阀上发现微量排气，同时伴有电解液的痕迹（潮湿，白斑），表示电池可能失效（干涸，这和电压没有直接关系）；发现外壳膨胀/正极端子变大/电解液从端子溢出意味着电池早已报废。由于一个单体电池可以决定整个电池的性能和可靠性，因此如果电池已接近使用寿命终点，那么电池必须进行完全的更换。

9.2.3　测量总电压和分电压

电池正、负极柱间的总电压应该根据单体电池/整体电池的温度和数量来设置，表6.8-14中所列出的为电池电压的指导值，在偏差范围内的数值都是允许的。检查时首先需要进行平衡充电，若发现电压值的差距具有不断扩大的趋势，预示着电池寿命即将终结。注意对于新电池来说，电压值的离散是常有的现象，然而6～12月以后，差距将缩小到可以允许的范围，如图6.8-33所示。检查时首先需要进行平衡充电，若发现电压值的差距具有不断扩大的趋势，预示着电池寿命即将终结。图6.8-33给出了电池电压分布随工作时间的变化规律，可以用于直观地判断电池的实际状况。

表 6.8-14 阀控式铅酸电池满荷电状态下的电压

电池类型	参考值（20℃，V）	浮充电压容许偏差（V）
单 体	2.27	2.17～2.37
6V-电池组	6.81	6.51～7.11
12V-电池组	13.62	13.02～14.22

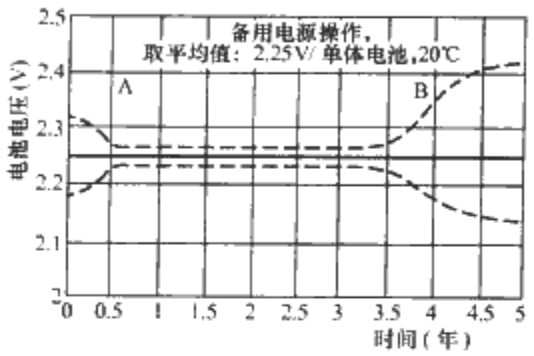


图 6.8-33 阀控式铅酸电池的电压分布随工作时间的变化规律

同样备用阀孔式密封铅酸电池在整个寿命期间的浮充电电流以及电池内部阻抗的变化也可以作为判断电池使用状态的重要参数。分别如图 6.8-34 和图 6.8-35。由图 6.8-34 显然可以看出，如果每隔一定时间测量电流，发现电流经下降（新电池）后开始上升，并且经过一段平台，则预示着电池寿命快要终结。

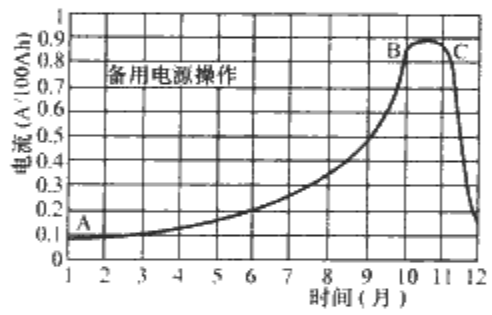


图 6.8-34 阀控式铅酸电池在寿命终止时的浮充电电流的变化趋势
A—正常情况；B—接近寿命终止；
C—由于电解质干涸，电池完全失效

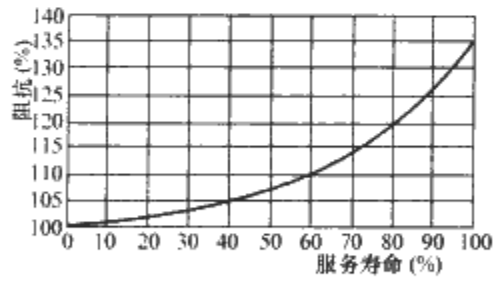


图 6.8-35 阀控室铅酸电池内部阻抗随服务寿命的变化趋势（用 60Hz 进行测试）

目前，有一些仪器制造商声称通过测量交流阻抗/电导，就能得到 VRLA 蓄电池的容量信息。某一频率的交流电（一般为市电频率 50Hz）通过电池的外极柱迭加在电池的两端。测出单体电池/单元电池的交流电压，并由此测定阻抗/电导率。然而，这些出售的测量仪器（部分并不能在每一种情况下均提供满意的结果，因此目前这种方法尚有不足之处，特别是因为它只基于一种频率进行测量。由此建议可将其作为一种辅助措施。如果使用叠加交流电的方法进行交流电压的测试（以此计算阻抗），发现阻抗有了明显差别，那么可能意味高阻抗单体或高阻抗单元电池可能出现了问题。

上述讨论虽然只主要针对备用状态的电池，但是所提出的原则和具体方法对其他用途的铅酸电池也基本可以适用。

9.3 安全问题

与铅酸电池相关的安全问题包括硫酸的泼撒可能在造成的伤害或对环境的危害、另外由于氢气和氧气的析出可能造成的爆炸以及如砷化氢和锑化氢有毒气体的析出可能的毒害等。采取恰当的防护措施，所有这些问题都可以得到满意地解决。在操作硫酸的时候穿戴面罩、塑料或者橡胶围裙和手套是防止硫酸烧伤的有效方法。如果酸接触到眼睛、皮肤或者衣服的时候，应立即和彻底地用干净的水冲洗，必要的时候要求助于医生。对溢出的硫酸通常可以用小苏打溶液（每 1L 水 100g）进行中和，并用大量水冲洗干净处理的区域。

为了防止充电过程中产生的氢气和氧气形成可能引起爆炸的混合气体（注意：当氢气在空气中的体积比占到 4% 时，就形成了爆炸性的气体），由此在大量使用和操作铅酸蓄电池的室内，必须要安装通气装置周期进行通风，同时采用氢气探测器，设置在最低爆炸限（LEL）的 20%～25% 予以报警等。

若将电池置放在电池箱内，则该箱体也应该与外界空气相通；为了防止火花或者火焰点燃混合气体，可能产生电弧、火花或者火焰的电源都必须装入防爆的金属盒中；同时必须严格禁止在电池附近吸烟、使用明火和进行可能产生火花的操作。

实际上，相当多数量的爆炸是由于对电池进行无控制的充电造成的。人们常常将电池从车辆上拿下，在一个无控制的充电器上进行长时间的充电。尽管充电的电流可能很小，有很少的气体累计，但是如果在此时挪动电池，这些气体排出，如果此时有火花存在，爆炸就可能发生。尽管铅钙合金板栅在电池中的应用已经大大降低了氢气的析出量，但是电池爆炸的可能性依然存在。因此严格防止滥充电是格外强调的安全须知，要让每个操作人员遵守充电规则与要求。

某些类型的电池会释放出少量的有毒气体如砷化氢、锑化氢等。这些电池在正极板或者负极板的板栅含有少量的锑和砷，这两种金属用于硬化板栅、减小循环过程中板栅的腐蚀速度。AsH_3 和 SbH_3 通常在含砷或锑合金材料与新生态的氢气接触而产生的，通常在过充电时发生，两种物质结合生成这种无色、无味的气体。它们非常危险，可能引起严重的疾病甚至死亡。1978 年 OSHA 规定的 AsH_3 和 SbH_3 浓度限分别为 0.1×10^{-6} 和 0.05×10^{-6}，该值是任何 8h 内所允许值的加权平均数。电池安置区域的通风非常重要，数据表明当通风设计将氢气的浓度维持在 20% 和 20%LEL（约 1% 氢气）以下时，锑化氢和砷化氢的浓度也会降到他们的致毒限度以下。

一般的 12VSLI 汽车电池具有很小的电击伤人危险。但随着系统的电压升高，电击伤人的危险性变得越来越高，如电动车辆的使用电压范围为 84～360V，对绝缘措施必须加强，以防止电击伤人。人们正在研究将高达 1000V 的直流电电池系统用作地方电网负载平衡的的可能性，此处电池即便处于放电态也是有电活性的，因此在这种使用中必须特别注意以下几点：

1）保持电池表面的整洁和干燥防止对地短路和腐蚀。

2）不要在电池表面放置金属器件。将所有用于电池的工具进行绝缘处理。

3）在检查和对电池进行维护前，去掉随身佩戴的珠宝等任何导电体。

4）在提升电池的时候，必须使用绝缘的工具，以避免提升链条和挂钩将电池端子间短路。

5）在电池搬运以前，确保电池内无累积的气体。

除上述几点外，应该注意阀控式铅酸电池的两个独特和基本的安全注意事项，以确保它们的使用安全，即关注析气和防止短路。

1）关注析气问题。阀控式（VRLA）电池在推荐的倍率进行充电和过充电过程中产生的氧气将在 VRLA 电池中100%被复合，因此没有氧气释放。在正常使用中，会有少许氢气甚至二氧化碳释放出来。该结构电池的合金板栅组成已使氢气的产生量最小化；而少量二氧化碳则可能是电池内部的有机化合物氧化而形成的。

由于氢气能够以相对快的速度渗透塑料容器，因此电池中多数情况下都允许气体释放到空气中。但是如果将 VRLA 电池放在一个封闭的容器中使用，就必须要做好防范措施使产生的气体能释放到空气中，防止积累到危险的浓度水平。

析气成为严重问题的情况乃是关联着充电器的潜在失效，假如充电器出故障而引起充电倍率高于推荐值，势必会有大量的氧气和氢气从电池中释放出来。由此必须防止这些气体的聚集，因此要求充分通风。显然 VRLA 电池不应该在一个不通风的容器中使用，并且不应该完全密封，因为这样阻碍电池正常的通风和气体的正常排放，甚至会在密闭容器产生相当高的气压。这种情况在贮存期间出现时，是由于二氧化碳气体的不断产生而造成的；而在充电期间，则是氢气的析出造成的。

2）防止短路。这类电池的内阻很低，如果外短路电池，就会大电流放电。其结果是产生的热量可能导致严重的人员烧伤，而且这也是一种潜在的火灾危险。因此，在电池附近工作的任何人员，在戴金属手镯或金属表链工作时对此都应该引起足够的重视。操作时不慎将金属物品或工具置于极柱间，就可能会导致严重的皮肤烧伤。

第9章　碱性蓄电池

碱性蓄电是采用碱溶液（KOH 或 NaOH 水溶液）为电解质的蓄电池总称，如表 6.7-1 中所列出的镉/镍蓄电池、氢/镍蓄电池、金属氢化物/镍蓄电池、锌/银蓄电池、锌/镍蓄电池。此外还有铁/镍蓄电池、碱性锌/二氧化锰可充电电池、镉/银蓄电池、锌/空气蓄电池和氢/银蓄电池等均属于碱性蓄电池范畴。由于碱溶液的电导率很高，因此多数碱性蓄电池具有良好的高倍率放电能力（如锌/银和镉/镍蓄电池的放电率可达 10～20C 等），能满足飞机应急启动、变电站大型开关的自动合闸，电动鱼雷的操雷动力源等要求；同时，碱性蓄电池中的镉/镍和氢/镍蓄电池具有很好的耐过充电性能，并实现氧在负极上的复合，因此这类电池不仅有长的循环寿命，还可以设计成密封型和全密封型结构。目前小型圆柱形密封镉/镍和金属氢化物/镍蓄电池已成为典型的消费类商品，广泛用于对讲机、电动工具、电动剃须刀、收录机、电动玩具和军用电台等的电源。而全密封镉/镍和氢/镍蓄电池则已成功地用于低轨道和同步轨道卫星，作为与太阳电池匹配的贮能电源等。

在碱性蓄电池系列中，目前镉/镍电池和金属氢化物/镍电池是应用最普遍和商品化规模最大的电池。这两种电池具有相同的电压，一般其标称电压为为 1.2V，因此互换性极好。因此随着要求减少镉污染的呼声越来越高，金属氢化物/镍电池的取代趋势越明显。其中，在回收困难的小型电池领域，取代进展较快。

由于氢/银蓄电池只在过去进行过研究和局部应用，现在已无产品生产和应用，故将不予介绍。而锌/镍蓄电池、碱性锌/二氧化锰可充电电池和锌/空气蓄电池尚处在小量应用和技术发展阶段；同时铁镍蓄电池作为一个老产品逐步退出市场。因此在本章中将重点介绍镉/镍蓄电池、金属氢化物/镍蓄电池和氢/镍蓄电池。

1　镉镍蓄电池

镉/镍电池按照电极结构不同，分为有极板盒电极，包括袋式和管式电极；无极板盒电极，包括多孔烧结电极、泡沫镍（或纤维镍）电极、拉浆（涂膏）电极等。大多数这类电极都可制成开口式和密封式两种类型电池。其中，大容量电池采用有极板盒电极，开口式居多；密封电池采用无极板盒电极的居多。

1.1　化学原理

电池的正极活性物质是氢氧化镍和羟基氧化镍（NiOOH），负极活性物质是海绵状金属镉，氢氧化钾或氢氧化钠的水溶液作电解液。电池的充放电工作原理如图 6.9-1 所示。

相应图 6.9-1 所示的电池的充放电反应可用以下反应方程式表示

正极反应

$$2NiOOH+2H_2O+e\underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}}2Ni(OH)_2+OH^-$$

负极反应

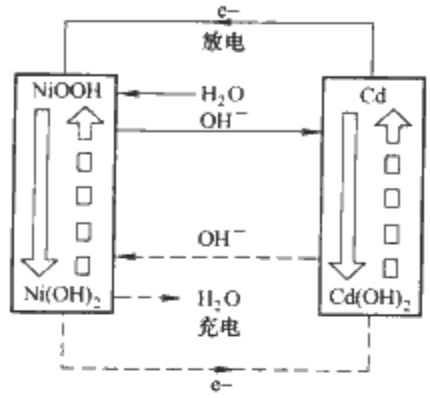


图 6.9-1　电池的工作原理示意图

$$Cd+2OH^-\underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}}2Ni(OH)_2+Cd(OH)_2+2e$$

电池总反应

$$2NiOOH+2H_2O+Cd\underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}}2Ni(OH)_2+Cd(OH)_2$$

放电过程中三价的氧化镍还原为二价的氢氧化（亚）镍，金属镉氧化成氢氧化镉，并且伴随着水的消耗。充电时，发生上述反应的逆反应。该反应的电动势为 1.29V。在电池工作期间，活性物质可逆地发生氧化还原反应，由于活性物质几乎都不溶于碱性电解质，如果能控制电池循环过程中正极材料的相结构组成，就可以保证电极的物理状态不发生明显变化。同时充放电过程中的电解质浓度变化很小。上述性质使得镉/镍电池具有循环寿命和搁置寿命长，放电电压在较宽的放电倍率范围内保持相对平稳的特征。

在镉/镍电池的充电过程中，即使当充电率足够低时，也会发生如下析气反应

$$4OH^-\longrightarrow 2H_2O+O_2+4e$$

若充电率略微升高，就会使氧气的析出过电位随之升高，以至使氢氧化镍转化成氧化镍的反应比析氧反应优先发生。但是，当 80%左右的氢氧化镍转化成氧化镍后，析氧反应便又开始发生，并一直持续到 100%荷电状态，此后就只进行析氧反应了。

负极充电至基本达到 100%荷电状态时，才开始发生析氢反应，见下式

$$2H_2O+2e\longrightarrow H_2+2OH^-$$

镉电极上的析氢过电位非常高，在 C/10 率充电时约为 110mV。因此当负极开始过充电时，电压急剧上升，多种充电方法都利用这种电压突升来控制或终止充电。

当正、负极都处于过充电期间，全部电流都用于将水电解为氢气和氧气，总反应为

$$2H_2O\longrightarrow 2H_2+O_2$$

镉/镍电池过充电反应消耗水，导致单体电池中电解质的量减少。因此通过控制过充电量可以减少水的损失，从而在开口电池中尽可能增大两次补水操作的间隔时间。

通常在单体电池中负极容量过量 50%，因此电池容量受正极限制。但这种比例在密封电池设计中会发生一定变

化，以保证氧气在活性镉负极上的化学作用。

与铅酸电池中的硫酸不同，氢氧化钾电解质的密度和组成在充放电过程中变化不大。电解质密度一般约为1.2g/mL。电解质中常加入氢氧化锂来改善循环寿命和高温性能。

1.2 有极板盒式开口电池

有极板盒式镉/镍电池是指将活性物质装填于镀镍冲孔钢带制成的扁平袋中形成正、负极而装配成的电池。有时这种电池也称为袋式电池，由于采用开口结构设计，故又称为有极板盒式开口电池。在镉/镍电池的充电过程中，总是存在着竞争反应——水的电解反应。在充电末期，通常正极析出氧气，负极析出氢气。对于开口电池，气体排出电池外，因此也叫做排气式电池。

有极板盒式开口镉/镍电池是历史最悠久的镉/镍电池。电池显示可靠、耐用、长寿命的基本特点。电池体系也具有良好的高放电率性能，使用温度范围宽的优点，同时其荷电保持能力也是镉镍蓄电池系列中最突出的，可在任意条件下长时间贮存，且电池不会受到任何损坏。有极板盒式电池还能承受过充电、反极及短路等滥用条件，基本不需维护，其单位能量（Ah）对应的成本除高于铅酸电池外，低于其他任何体系的碱性蓄电池。

有极板盒式电池规格多样，容量从5～1200Ah以上，且应用广泛如铁路、电力开关、远程通信、不间断电源以及应急照明等。

为了适应不同应用的需求，有极板盒式电池的极板分为三种厚度。分别相应高倍率设计的薄极板，获得最大的极板真实表面积，适于高倍率放电要求；低倍率设计的厚极板，获得活性物质最大载量，适于长时间放电要求；中倍率设计的中等厚度极板，适于在中等倍率下较长时间放电。

1.2.1 电池结构

新型有极板盒式电池的局部剖视图见图6.9-2。这类电池中的正极活性物质为添加了石墨和钡/钴化合物的氢氧化（亚）镍，石墨用以增加导电性，钡/钴化合物则用以提高寿命和容量。负极活性物质为添加了铁或铁化合物的氢氧化镉或氧化镉，有时还加入镍。铁和镍的加入是为了稳定镉，防止晶体生长和聚集，并提高导电性。

有极板盒式镉/镍电池的正负极活性物质是直接填入到由冲孔钢带制成的扁平袋中，电极的孔率在15%～30%之间。钢带曾镀有镍，以防止正极活性物质发生“铁中毒”。

电极可做成不同的厚度（1.5～5mm），以满足高、中、低放电倍率电池的需要，且负极极板总是比正极极板薄(30%～40%)。

电极通过螺栓或焊接连接在一起，形成极群。以正负电极相互交错的方式将正负极群组合在一起，并用塑料钉或绝缘片将正负电极相互绝缘。有时电极间用隔膜、冲孔塑料片或塑料网栅隔开。不同规格电池中的正负极板间距不同，对于高倍率电池，间距小于1mm，对于低倍率电池可达3mm。

将极组放入塑料电池壳或不锈钢电池壳中。塑料电池壳一般由聚苯乙烯、聚丙烯或阻燃塑料制成。相比不锈钢电池壳，其突出优点是透明且耐腐蚀，由此可以观察电解质的液面高度，同时无需防腐措施。此外，塑料电池壳更轻，能更紧凑地排列。但是塑料电池壳对高温敏感，而且体积较大。

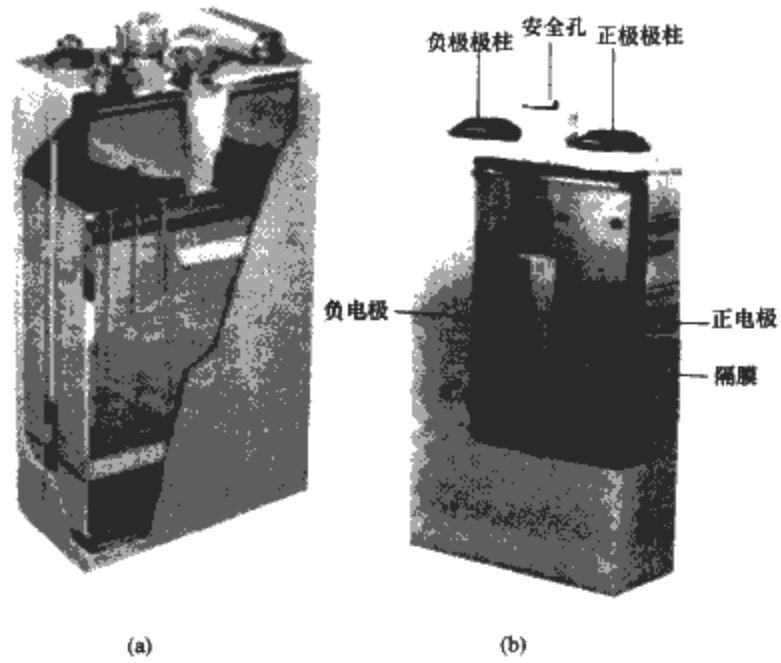


图6.9-2 有极板盒式电池局部剖视图
（a）典型有极板盒式电池的剖面图；
（b）典型纤维极板式电池的剖面图

1.2.2 工作性能

有极板盒式单体电池的体积比能量和质量比能量通常分别为20Wh/kg和40Wh/L，市售产品最高能达到27Wh/kg和55Wh/L。这些数据都是基于5h率放电时的额定容量和平均放电电压计算而得到的。

有极板盒式镉/镍电池能以高倍率放电，且容量的损失不大。即使放电电流高达5C（A），高倍率设计电池仍可释放出60%的额定容量，而且电池的工作采用标准电解质的有极板盒式镉/镍电池可在－20℃下使用。若增大电解质浓度，使用温度可降至－50℃。温度对中倍率有极板盒式镉/镍电池（采用标准电解质）性能的影响见图6.9-3。虽然偶尔在更高的温度下使用并不会对电池造成损害，但通常将45～50℃作为电池长时间工作的上限温度。

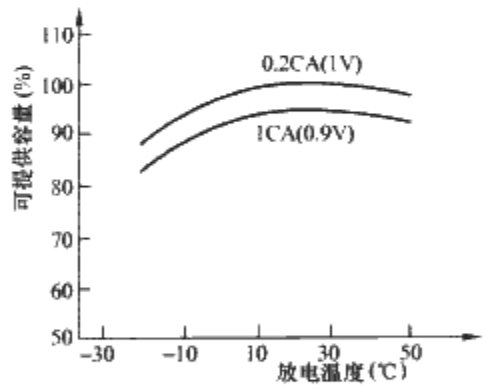


图6.9-3 使用标准电解质的中倍率有极板盒式镉/镍电池满荷电时输出容量与温度的关系（温度25℃）

室温下有极板盒式电池的寿命可以用充放电循环次数表示，也可以用时间（年）表示。在正常条件下，有极板盒式镉/镍电池的循环寿命可达2000次以上。若用时间表示为8～25年，甚至更长，这主要取决于电池的结构、具体应用以及使用条件。柴油发动机起动电源的寿命通常为15年，火车照明电源为10～15年，固定式备用电源为15～25年。

有极板盒式开口电池在25℃下的荷电保持性能见图6.9-4。显然，荷电保持能力受温度影响，电池在45℃下的容量损失约比25℃时高三倍。当温度低于－20℃时，电池实际上已经不会发生自放电。

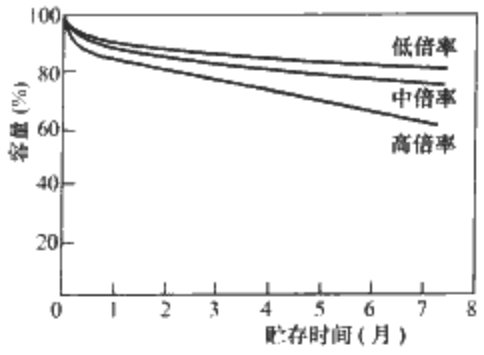


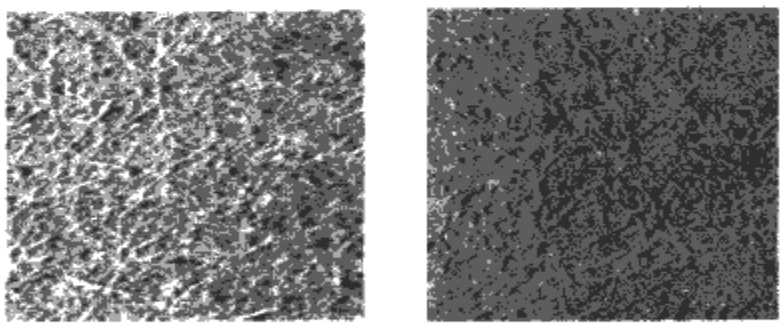
图 6.9-4　有极板盒式电池的荷电保持能力
（温度 25℃）

1.3　纤维镍基体电池（简称 FNC 电池）

纤维镍基体电池是指采用纤维镍极板填充活性物质形成的正、负极组装成的电池。与有极板盒式电池相比，反应原理和一般工作特点都完全相同。只是由于基体导电性好、电极孔率高使活性物质载量增大、具有开放式结构能充分吸收电解质等，由此使电池的高倍率放电能力更强。纤维镍基体电池是 20 世纪中后期才发展起来的产品体系，目前主要在德国和美国生产，其中德国 Hoppecke 公司已在我国设立了子公司，进行该类产品的销售与售后服务。用于德国为上海地铁提供的列车配套辅助电源系统等。

纤维电极（FNC）技术的核心是三维镀镍纤维基体结构，见图 6.9-5。采用这种极板可用于设计超高倍率（XX）、高倍率（X 和 H）、中倍率（M）和低倍率（L）电池，且由同一工艺制造，只是选择厚度从 0.5～10mm 不等。镍纤维的排布非常致密，单位体积（$1cm^3$）电极上导电纤维的长度通常能达到 300m。这种集流体的孔率为 90%以上，能获得较高的活性物质利用率和改善低温性能。

纤维极板镉镍（FNC）电池的电池壳和电池盖均由聚丙烯制成，并焊接在一起。从图中可以看到，极组由负极、波浪形隔板和正极构成。极柱与电池盖的密封处使用 O 形密封圈，保证不泄漏，电池盖上的两个极柱中间有一个泄气阀。对于某些应用，泄气阀中还装有气体复合催化芯。电池极柱采用镀镍的铜材料制成，电解质采用密度为 1.19kg。



(a)　　(b)

图 6.9-5　纤维电极三维镀镍纤维基体
（a）高孔率纤维镍基板图；
（b）填充活性物质后、化成前的镍正极

在 FNC 技术发展过程中，首次开发出了免维护高倍率方形 FNC 镉/镍电池。在电池中，采用未进行填充的镍纤维极板置于两片镉负极之间，就相当于在一片负极中间形成一个未填充的区域，氧气在此区域快速发生还原反应。FNC 极板上的孔相对较大，氧气很容易通过它，到达复合反应表面，见图 6.9-6。

型号为 KCF XX47 的密封 FNC 电池在进行短路实验时可输出高达约 4000A 的电流，这一结果表明，密封 FNC 电池具有超大电流放电的能力。KCF XX47 电池用于大型辅助电源（APU）和直流电机起动。12V 恒压放电的结果表明这种电池具有非常出色的功率特性（见图 6.9-7）。28V 47Ah 电池组不仅在常温下，而且在低温下（－18℃）显示出可以满足大型宽体飞机 APU 的起动要求。

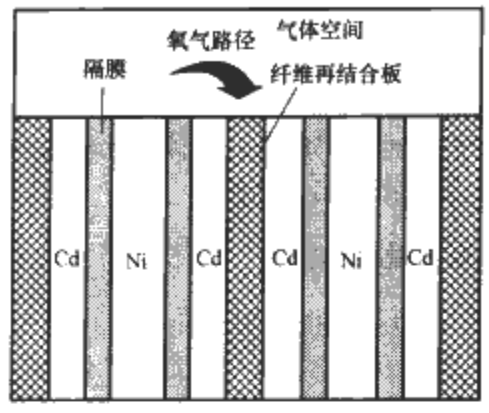


图 6.9-6　密封纤维极板镉/镍电池电极组结构

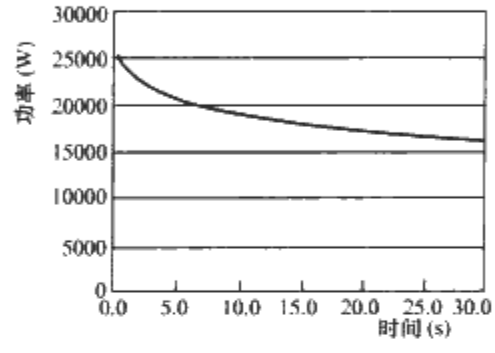


图 6.9-7　XX47 型电池组（额定容量 47Ah）的恒电压（12.0V）放电曲线（室温）

在大型工业电池中，除 FNC 电池外，还有一种粘结式电极电池。粘结式电池是指采用聚四氟乙烯（PTFE）作为粘结剂制备出正、负极后，再组装成的电池。

由于镉/镍电池的成本高于铅酸电池，因而工业用电池市场几乎被铅酸电池所垄断，而镉/镍电池只应用在某些特定领域。如今在全球范围内，在要求可靠性高的应用场合，大型工业镉/镍电池已成为其首选。在铁路和公共交通用固定式电源中，大约 40%的工业用有极板盒式镉/镍电池用于列车照明及空调、紧急和备用系统（如紧急刹车、电气开门）、公交车和地铁车辆的照明、火车机车和长途客车的柴油发动机起动、铁路信号、沿线通信以及火车站和交通控制系统的备用电源。但近年来随着对电池质量比能量和体积比能量要求的提高，粘结式电池和纤维极板电池也开始涉足这块市场，尤其是在高速列车、公交车、地铁和轻轨上粘结式电池和纤维极板电池都得到了应用。但在以坚固和耐用作为对电池主要要求的应用中，有极板盒式电池仍保持着其优势地位。

工业镉/镍电池作为备用和应急电源已大量用作如手术室的应急电源、海上石油钻井平台所有关键设备的备用电源、银行和保险公司大型计算机系统不间断电源（UPS）、重要生产设施的备用电源以及机场应急照明和着陆系统电源等典型应用场合，在这些应用中一旦断电将会带来生命和重大财产损失。此外。工业镉/镍电池还用在供电不能中断的发电站和配电系统等，这里一旦主电源失效，便需安装柴油发电机或燃气涡轮来继续供电。事实证明，工业镉/镍电池是确保上述发电设备能快速启动和可靠运行的最佳应急电源。

超高倍率（XX）和高倍率（X）的纤维极板镉/镍电池

主要用于飞机、军事和空间领域，如波音 777 的主电源和 APU 电源、麦道（现在属于波音）MD—90 的 APU 和应急定位电池，以及“阿帕奇”直升机的主电源。

在这三种工业电池中，有极板盒式电池的特点是成本最低、可靠性高、安全（能自动防止故障的发生），但其体积比能量和比功率限制了在某些领域的应用。纤维镉/镍电池的内阻低于有极板盒式电池，且电池可设计成为超高倍率、高倍率、中倍率和低倍率电池。对体积比能量和比功率要求较高的应用，可选择粘结式电池。

1.4 开口烧结式镉/镍电池

烧结式镉/镍电池是指采用多孔烧结镍基板浸渍活性物质制备电极而组装成的电池。一般正极和负极都采用烧结式极板的称为全烧结电池；而只有正极采用烧结极板的电池则称为半烧结电池。

由于烧结式电极基板是球形粉体镍烧结而成的，它具有高孔隙率（75%～85%）和微孔结构（见图 6.9-8）。这种烧结电极不仅使浸渍活性物质沉积时得到均匀而细小的颗粒，能保持与镍基体有更充分的电联结；而且具有更大的反应表面积；同时这种电极比有极板盒式和纤维镍电极更薄，从而使单体电池的内阻更低，高倍率性能和低温性能都有极大提高。特别是高倍率放电能力甚至比纤维极板还好。由于具备上述特点，因此开口烧结式镉/镍电池能够应用在高功率和超高功率的放电应用领域，如航空涡轮发动机和柴油机的起动、电站和变电站的应急自动合闸以及其他特种应用中。此外烧结电极技术进一步用于了密封和全密封镉/镍电池，前者用于包括便携式用电设备或装置中需要大电流放电的应用场合，而全密封电池则成功用于卫星等宇航贮能电源系统中。显然，烧结式技术的发展在镉/镍电池发展史上有着里程碑的意义。

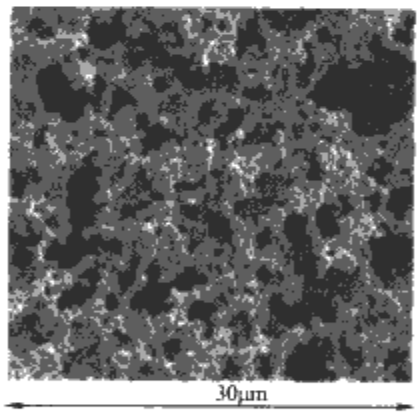


图 6.9-8 由镍粉烧结形成的多孔基体照片

1.4.1 电池结构

典型的开口烧结式镉/镍电池的结构见图 6.9-9。

在开口电池的设计中，正负极在充电时应几乎同时达到满荷电状态。然而从原理上看，正极在达到满荷电状态前即开始析出氧气。此时若气体阻挡层失效，氧气将会到达负极发生复合反应，产生热量。这不仅会阻止负极充电至满荷电状态，而且会由于镉电极的电极电位升高而导致电压降低。为使正负极最大限度地充满电，必须采取足够的预防措施防止氧气在负极发生复合反应，具体的方法是在正负极之间放置气体阻挡层，同时用过量的电解质淹没极板。

1.4.2 烧结电极的制造过程简介

（1）骨架准备：用于镉/镍电池烧结电极的骨架一般采用冲孔镀镍钢带或镍带，商品化电池多采用前者，只有航天及特种应用产品选用纯镍带为骨架。镍带在碱溶液中的耐腐蚀性优于镀镍钢带，但价格明显高于镀镍钢带。目前冲孔镀镍钢带骨架的厚度已降低至 0.07～0.08mm，穿孔率可达 50%以上。

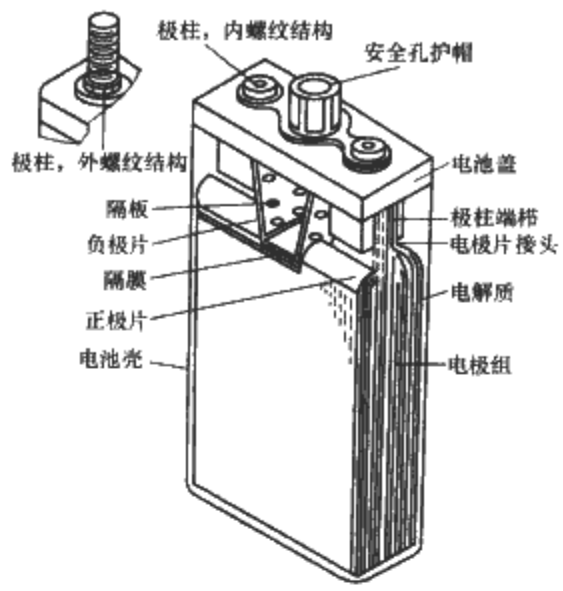


图 6.9-9 开口烧结式镉/镍电池的剖面图

（2）配制浆料或混合粉体：在拉浆法（又称湿法），要配制由镍粉（一般为羰基镍粉，形状为球形，粒度为微米级）、粘合剂和添加剂组成的粘稠混合物，称为浆料。

（3）湿法浆料连续涂敷与基体连续烧结：在一个具有连续涂敷镍浆和通过刮刀控制浆层厚度后，可以在连续的拉浆基体经干燥及在约 1000℃左右的还原气氛中进行烧结，就得到多孔基板（浸渍活性物质前的烧结结构一般称作“基板”，其孔结构如图 6.9-9 所示），其孔率通常为 75%～85%，厚度为 0.40～1.0mm。另一种是干粉模具压制与基体烧结（又称干法）：在干法中，编织镍网或穿孔镍带通常预切割成所谓的母基板的尺寸，然后置于模具中，两面均压上松散粉末后进行烧结。烧结过程通常采用带式炉，在800～1000℃的还原气氛中进行。后一种方法不适用大生产要求，只用于制造特殊电池（如卫星电池）使用的基板。

（4）浸渍活性物质：浸渍就是在多孔烧结极板的微孔中分别沉积氢氧化镍和氢氧化镉，制造出正负电极（或称极板）。基板在硝酸盐浓溶液中浸渍后，可以通过化学沉积或电化学沉积工艺将硝酸盐转化成氢氧化物。

（5）极板化成：极板在浸渍之后，先用机械的方式刷净表面，然后通过充放电循环进行电化学清洗与化成。这一工艺促使消除电极内的杂质，同时使电极活性物质状态得到调整。由此就制备出了如图 6.9-9 所示开口镉/镍电池的最核心部件——“烧结式正极”与“烧结式负极”。

在电池中采用的隔膜具有多层结构，包括用于使正负电极电绝缘的织物（一般为耐碱的尼龙布或尼龙毡）和作为气体阻挡层的离子渗透塑料膜（一般选用微孔聚丙烯膜等）。在电池中一般采用 KOH 电解质，以电池和放电态为基准时，其浓度约为 31%（密度为 1.30）。这一浓度有利于提高电池在低温下的工作能力。电解质中溶解二氧化碳就会生成碳酸钾，将明显影响电池性能，因此必须通过洗涤等措施将碳酸钾含量降至最低。开口方形电池一般是用尼龙注塑壳体，盖子上设计带有单向阀作用的气塞，如图 6.9-9 所示。

1.4.3 工作性能

1.4.3.1 放电特征

典型的开口烧结式镉/镍电池在不同电流下的放电曲线见图 6.9-10，在不同温度下的放电曲线见图 6.9-11。显然这种电池的最大特点是具有极高的放电率能力（高达 20C）和良好的低温性能（－40℃下可放电），并且放电电压十分平

稳，即使在较高的放电速率和低温下亦是如此。

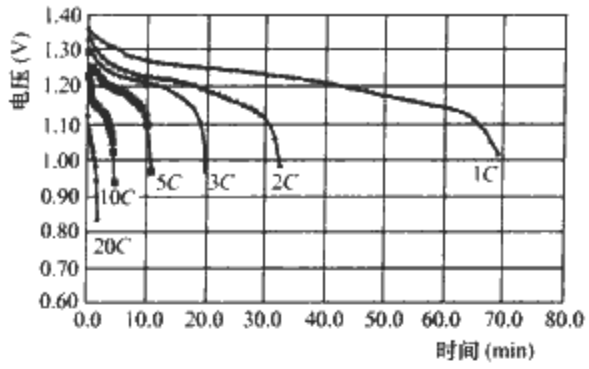


图 6.9-10　不同倍率下的典型放电曲线（25℃）

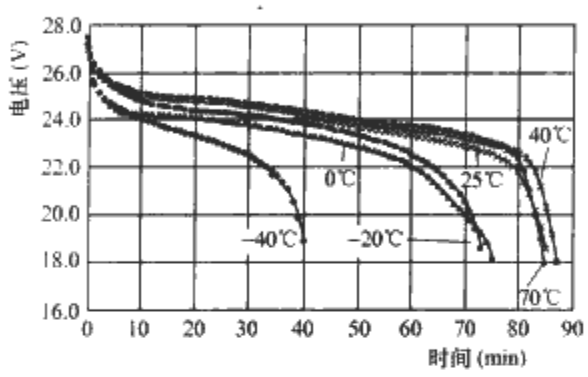


图 6.9-11　由 20 只单体电池构成的电池组在不同温度下的典型放电曲线（1C）

由于开口烧结式镉/镍电池内阻极低，可以高达 20～40C 的脉冲电流放电，因此成功地应用于功率要求非常高的领域，如发动机起动等。

1.4.3.2　贮存特性

烧结式镉电池可以在很宽的温度范围（－60℃～60℃）内，以任意荷电状态进行长期贮存。电池在贮存前应进行清洁和干燥处理。为防止发生腐蚀，单体电池间的连接片上可涂一薄层凡士林予以防护。若贮存期超过 30 天，应先将电池完全放电并用导线使其短路，再进行贮存。以放电态贮存超过 30 天的电池首次使用时，应采用小电流缓慢充电，以利于电池状态的恢复。

1.4.3.3　电池寿命

电池寿命在很大程度上受到设计、维护和恢复以及使用方法等因素的影响，为了使电池获得最佳寿命，应使电池在正常的温度下工作，采用有温度控制的充电，并尽量减少恢复操作。与前面已描述的有极板盒式与纤维电极开口电池一样，电池中设置有气体阻挡层，其主要作用是防止电池内生成的气体在极板间迁移并发生复合反应。通过防止气体的复合反应就可以确保正负极都能达到满充电状态，从而使过充电开始时就出现过电压，而这种过电压可以作为控制充电的反馈信号。但这样会使电池向外排出气体，从而导致水的消耗。故要使电池正常工作和得到长的寿命，必须适时进行水的补充。

设计和使用开口电池的主要原因就是可以利用所提供的“电压信号”，使电池在不牺牲其他性能的前提下，对电池采用高充电率进行充电直至过充电的发生。但是必须注意到过充电虽然可以使电池恢复到较高的容量，但是过充电量越多，消耗的水越多；而且如果充电过度的话，会对电池造成损害。一般充电量应控制为放电容量（Ah）的 101%～105%。

1.4.4　典型产品的型号、尺寸和性能

表 6.9-1 列出了我国生产的几种超高倍率烧结式镉/镍电池典型产品型号、尺寸和特性，这些电池是专门用于电站或变电站开关柜的应急电源，用于事故合闸和照明。

表 6.9-1　全烧结式方形开口镉镍蓄电池产品型号、尺寸和性能

型　号	标称电压 (V)	额定容量 (Ah)	外形尺寸 (mm) 长	宽	高	重量 (kg)	循环寿命 (次)	充电电流 (A)	放电电流 (A)
GNC10	1.2	10	80.5	28	226	0.9	>500	0.1～1 C_5A	25C 放电
GNC20-1	1.2	20	80.5	28	226	1.1	>500		
GNC20-2	1.2	20	80.5	32	238	1.3	>500		
GNC40	1.2	40	80.5	46	250	2.05	>500		
GNG60	1.2	60	121	46	270	3.0	>500		
GNG80	1.2	80	147	78	284	5.1	>500		
GNG100	1.2	100	147	78	284	5.7	>500		

1.5　密封镉/镍电池

如同密封铅酸电池一样，密封镉/镍电池是通过特殊的结构设计和内部组成选择，使电池在充电后期，正极上产生的氧气可以在负极上复合，以致避免电池内部压力升得过高，从而可以实现电池的密封。由此就能实现除充电外，无需其他维护的使用要求。密封镉镍蓄电池的上述特点使其从轻型便携式电源（摄影器材、玩具、无绳电话、家用电器）到高放电率组合电源（对讲机、小型收录机、便携式摄像机、电动工具等电器）以及大型备用电源（电站等重要场所的事故照明与报警等）的不同领域中具有广泛的应用。随着电子技术的发展，对那些使用要求高的镉/镍电池组，还特别设计与安装了智能控制电路，可显示荷电状态并防止过充电和过放电。与密封铅酸电池进行比较，密封镉/镍电池的主要优缺点见表 6.9-2。

表 6.9-2　密封镉/镍电池的主要优缺点

优　点	缺　点
1. 循环寿命长 2. 低温和高放电率性能优良 3. 搁置寿命长（任何荷电态下） 4. 耐过充电和过放电能力强 5. 具有快速充电能力 6. 比铅酸电池更易小型化（如可制成扣式电池）	1. 存在记忆效应问题 2. 成本高于密封铅酸电池 3. 荷电保持能力差 4. 高温和浮充性能比密封铅酸电池差 5. 镉与铅都属有毒与污染环境物质，但铅电池和电池中的铅都比较容易回收

1.5.1　工作原理

密封电池的充放电反应与开口电池完全一样。但是与开口电池设计不同，密封镉/镍电池的负极活性物质是过量的，由此在充电末期和过充电时，负极上继续发生相应的还原反应（尚未发生析出氢气的反应），而正极上却发生析氧反应。如密封铅酸电池中的情况类似，氧气可以穿过隔膜到达负极，并与活性镉负极发生如下复合反应

$$Cd + 1/2O_2 + H_2O \longrightarrow Cd(OH)_2$$

密封镉/镍电池中的氧气析出及其穿过隔膜迁移到负极上的复合反应原理也可以用图 6.9-12 加以描述。电池中采用了能透过氧气的隔膜，并采用了有限的电解质（贫液体系），都有利于氧气的迁移。

由图 6-9.12 看出，过程Ⅰ标志充电在进行中，两个电极逐步转换成荷电态（图中由白色转为黑色）；过程Ⅱ标志正极首先接近充满电时，电极上即开始析出氧气；过程Ⅲ标志继续过充电时，氧气可以穿过隔膜迁移至负极上进行化学

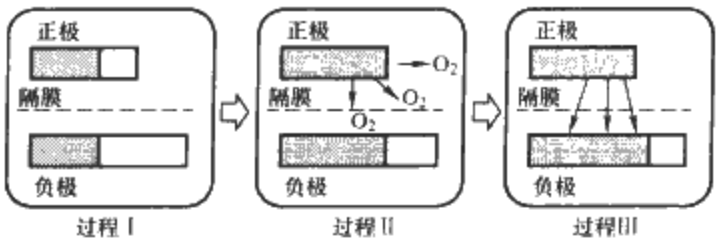


图 6.9-12 氧气在密封镉/镍电池中的复合过程原理示意图

复合，由此抑制了内部气体的积累。

1.5.2 电池结构

密封电池的结构是多样化的，包括了圆柱形、方形和扣式电池三类。在这三类电池结构中，圆柱形密封镉/镍电池是使用最为广泛的便携式电池，且最易于实现大生产。典型的圆柱电池结构如图 6.9-13 所示。

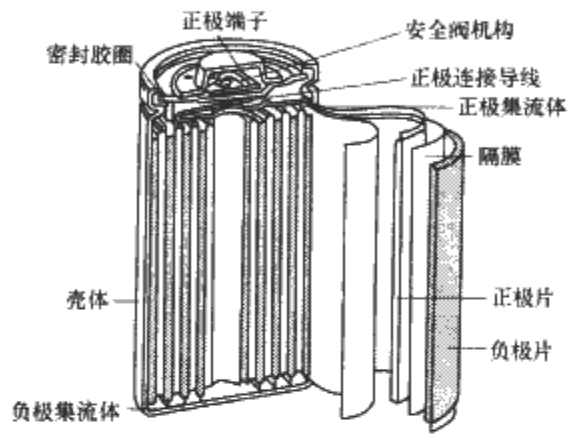


图 6.9-13 圆柱形密封镉/镍电池的结构

在 20 世纪 90 年代随着便携式电子产品（如手机等）的快速发展，特别发展出小方形电池，常称为“口香糖”式镉/镍电池，如图 6.9-14 所示。但在金属氢化物/镍电池和锂离子电池问世和大生产后，由于性能远优于镉/镍电池、而且无环境污染问题，因此这种“口香糖”式镉/镍电池已经基本退出市场了，它首先被同类型“口香糖”式金属氢化物/镍电池取代，后来又大部分让位于锂离子电池。

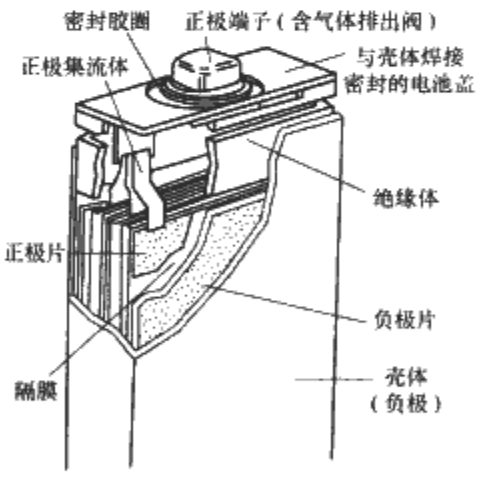


图 6.9-14 小型角形密封镉/镍电池的结构

在便携式镉/镍电池市场发展的强势阶段，镉/镍电池的电极制造技术上曾有着相应的多元化发展，包括烧结式和泡沫式（或纤维式）正、负电极制造技术；前面已介绍过烧结式电极和纤维式电极（分别是由烧结镍基板通过浸渍正、负极活性物质和由纤维镍基板通过加压涂敷或浸渍填充正、负极活性物质制得）。负极另外还有拉浆式负极和电沉积负极。其中拉浆负极是将一定比例的氧化镉、镉粉、粘合剂、添加剂与纯净水配制的混合浆料，连续涂敷到穿孔镀镍钢带上形成的；而电沉积负极则是将海绵状镉直接连续电化学沉积到镀镍钢带上，经压制后得到的。其中泡沫镍作为基体的技术目前最为流行，这主要因为泡沫镍基体具有高达 95%或更高的孔隙率（如图 6.9-15 显示出的结构所示），单位体积包含的活性物质更多，使电极具有更高的体积比容量，而且工艺简单，原材料和制造成本都最低。

将制作好的正负电极带裁剪成一定尺寸，中间衬上隔膜后卷绕在一起。隔膜材料通常是尼龙无纺布或聚丙烯毡，它们具有很高的吸碱量和透气性。卷好的极组插入具有一定机械强度的镀镍钢筒中，装配好导电零部件。负极焊在或紧压在圆筒内壁上，正极连接在上盖上，电解质吸收在隔膜中，电池中不含游离电解质，电解质量虽然非常少，但已足以满足正常使用。盖板上装有安全阀，以防止过充电电量或充电率过高时造成内部压力过高而引起壳体破裂。

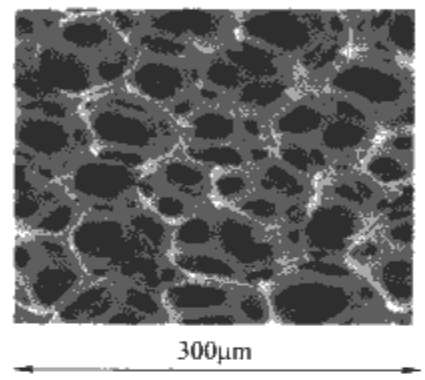


图 6.9-15 泡沫镍基体的多孔结构特征

1.5.3 工作性能

圆柱形电池在不同放电负载下的放电特性曲线见图 6.9-16。其放电特征呈现为在初始电压下降后紧跟着一长段的平坦曲线。电池所能释放的容量取决于放电率、放电终止电压、放电温度以及电池先前的使用情况。由图 6.9-16（a）不难看出，圆柱形密封镉/镍电池具有高放电率的优良特性，即使以 8C 连续放电，也显示出高而平稳的工作电压，并且有较高的放电容量（是额定容量的 80%）。图 6.9-16（b）

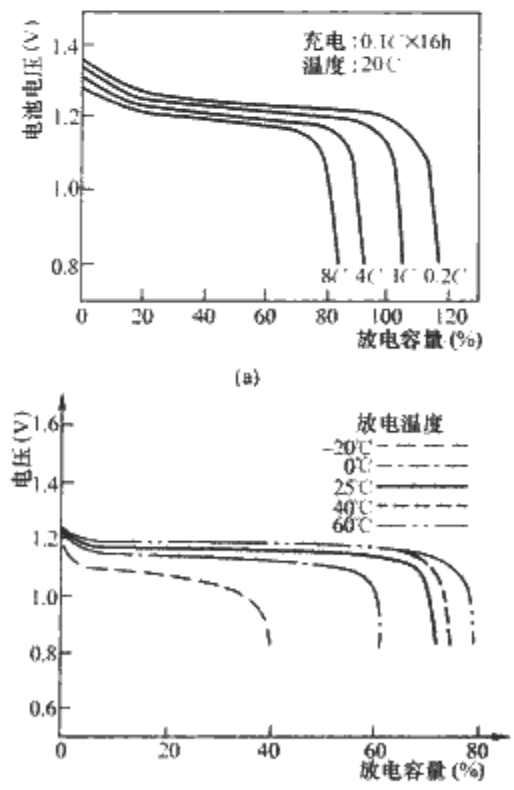


图 6.9-16 圆柱形密封镉/镍电池的恒电流放电曲线

（a）不同放电率；（b）不同温度

是在不同温度下电池以高放电率（8ItA 获 8C）放电时，所放出的容量（以额定容量的百分数表示）。由图看出电池以 8C 在－20℃下放电，还显示了较平坦的放电曲线，且放出了近 40%的额定容量。由此说明圆柱形密封镉/镍电池同时具有优良的低温性能，但是像其他电池一样，电池放电期间的中点电压随温度的下降而降低，特别在低温下格外明显。

由于圆柱形镉/镍电池具有优异的高放电率特性，尽管它污染环境备受关注，但直到目前，它依然是便携式电动工具电源的的主导产品，这也是尚不能由金属氢化物/镍电池取代的应用场合。而且，电动工具用圆柱形密封镉/镍电池已经由全烧结（两个电极皆烧结式电极）发展到半烧结（负极为拉浆镉电极）和非烧结（正极为泡沫镍电极，负极为拉浆镉电极或电沉积镉负极）电池。非烧结电池具有成本低和高容量的优势，利用高容量设计来降低实际放电率，是可以解决电动工具所要求的高电流放电能力。举例而言，一个烧结式 SubC（小 C 型）电池的容量为 1400～1500mAh；而非烧结式高容量 SubC 电池的容量为 2400～2500mAh。显然若电动工具需要烧结式电池以 20C 率放电，其电流值为 28～30A；这一电流值对非烧结式高容量电池来说，放电率只有 11.6～12.5C 率，非烧结式高容量电池是可以接受这一放电率的。

镉/镍电池在贮存期间的自放电率比密封铅酸电池高，一般室温下贮存 28 天的自放电率在 22%左右，而且自放电率受温度影响显著，典型的标准密封镉/镍电池在不同温度下的荷电保持能力如图 6.9-17（a）所示。显然在 40℃下，密封镉镍电池自放电已经十分严重了。密封镉/镍电池可在充电或放电态下贮存，除非是在高温下长期贮存，否则电池在贮存后通过充电（2～3 个充放电循环）即可恢复全部容量。这说明密封镉/镍电池贮存后的容量恢复能力是较强的，如图 6.9-17（b）所示。由图看出，即使电池在 40℃下贮存 2 年，经过 4 次充放电练习循环后，仍可恢复到接近输出额定容量的 95%。一般对密封镉/镍电池大多推荐放电态贮存模式，若有可能建议对放完电的电池实施短路，然后予以贮存。

密封镉/镍电池具有循环寿命长的特点。在实施充电控制的条件下，100%DOD（即 100%放电深度）循环时的循环次数可达 500 周期，见图 6.9-18。该电池是按照寿命测试的标准进行的，循环条件为充电电流 0.1C（A），充电 11h；放电电流 0.7C（A），放电 1h；每 49 次循环，进行一次容量测试。容量测量条件为充电电流 0.1C（A），充电 16h；放电 0.2C（A），放电至终止电压 1.0V。

一般浅放电时循环寿命更长；若电池部件的耐碱性能进一步提高，其寿命，尤其是高温下的寿命会更长。

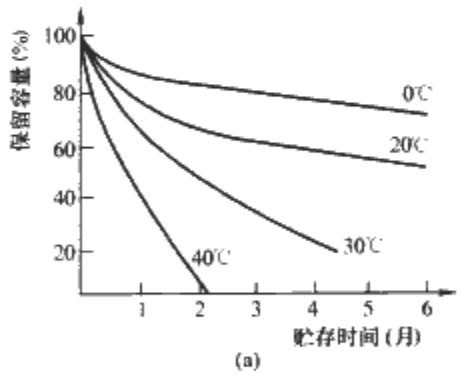


图 6.9-17　标准密封镉/镍电池的贮存特性

（a）容量保持能力；

（b）容量恢复能力，放电率 0.2C，贮存时间 2 年，温度 20℃（°）、35℃（·）、40℃（×）

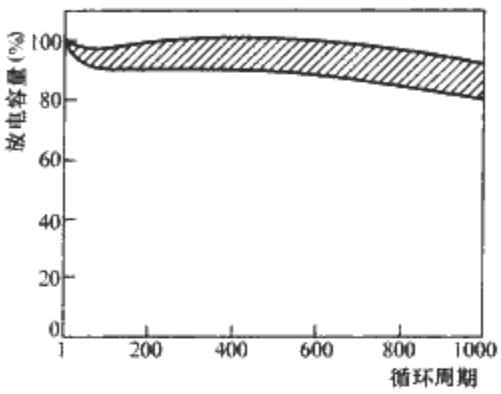


图 6.9-18　20℃下密封镉/镍电池的循环寿命

应该正确充电是保证密封电池得到安全、可靠与长服务期的关键之一。通常密封镉/镍电池采用恒电流充电，如以 0.1C 充电 12～16h（140%）。在这种低的充电率下，过充电不会对电池造成损害。大多数密封镉/镍电池的安全充电率确定为 C/100～C/3，若提高充电率，就特别要注意不能过度地过充电或引起电池温度升高。充电特性还与温度密切相关，密封镉/镍电池在不同温度条件下的典型充电电压曲线见图 6.9-19。可以看出，电压和峰值电压随着温度的升高而下降。密封电池的最佳充电温度为 0～30℃。若低于上述温度，则电压升高，氧气复合变慢，内压升高，因而充电率必须降低。当温度高于 40℃时，充电效率变低，若温度继续升高，则会导致电池损坏。

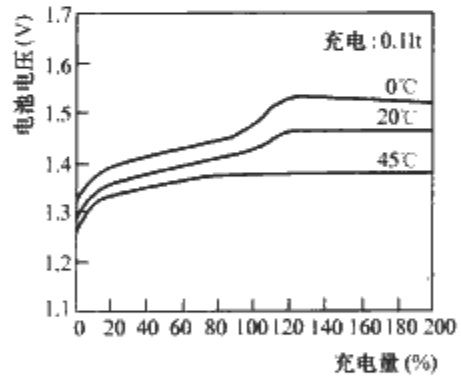


图 6.9-19　密封镉/镍电池典型充电曲线

在实际应用中对密封镉/镍电池进行充电时，除可以选择标准低充电率（如 0.1C）恒电流充电方法外，也可以选择有控制的“快速”充电方法。由于“快速“充电可以大大缩短充电时间，特别受到用户的欢迎。但是为了避免过度过充电或温度过高，必须采取适当控制措施，即通过控制电路来保证充电完成时终止充电或减小充电电流。密封镉/镍电池采用的充电控制方法有以下几种。

（1）定时控制：以中等大小的充电率充电时，可利用定时器控制充电的终止或将电流减小到涓流充电水平，这种定时控制装置的成本相对较低。

（2）温度控制：采用温度传感器来探测电池温度的升高情况并终止充电，一般探测温度通常设置为 45℃。但温度测试的准确度受位置影响，很难测准。由此易于造成电池的过充电，因此电池的循环寿命比采用－ΔV 法或峰值电压法

充电时短。

（3）$-\Delta V$ 法：对于密封镉/镍电池，这是优先选用的充电控制方法之一。密封镉/镍电池在充电过程中，当电压达到峰值后会出现一个电压下降，如图 6.9-20 所示。可利用该信号来终止充电或将电流减小到涓流充电水平。$-\Delta V$ 法可以保证电池充满电，且不受环境温度及电池剩余容量的限制。通常当单体电池的电压下降 10～20mV 时终止充电。当充电率低于 0.5C 时（如图 6.9-19 所示），不适合采用该方法进行充电控制，因为此时 $-\Delta V$ 值太低，难以检测到。

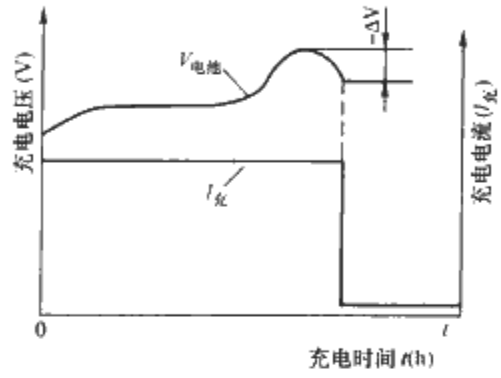


图 6.9-20 密封镉/镍电池的 $-\Delta V$ 法充电控制原理图

（4）涓流充电和浮充电：涓流充电方法用在两种不同的场合。一是用于备用电源，在此场合下电池要进行持续充电（补偿自放电），以始终保持满荷电状态，在主电源失效后立即为负载供电；另一种是作为电池快充电终止后的补充充电，此时充电速率为 0.02～0.05C，具体大小取决于放电频率和深度。为保证电池性能最佳，建议充电后每隔 6 个月进行一次深放电。

1.5.4 密封镉/镍电池的记忆效应及其消除方法

当密封镉/镍电池进行重复的浅放电（未释放出全部容量即终止放电）－充电循环时，电池容量可能发生可逆损失。如图 6.9-21 所示，如果电池在进行重复充放电循环的过程中，仅仅部分放电后即充电，那么随着循环的进行，电池电压和释放的容量会逐渐降低（曲线②代表重复循环）。若电池随后进行全放电（曲线③），则放电电压低于最初全放电时的放电电压（曲线①）。从图中可以看出，放电可以分为两步，电池达到原先的终止放电电压时不会释放出所有容量。上述现象称做“电压下降”，也称做“记忆效应”，表示电池好像是记住了浅放电时较低的容量。工作温度的升高会促进该类可逆损失的加速。

但只要经过几个控制一定条件的全充电－全放电循环，电池就可以恢复容量，如图 6.9-21 的曲线④和⑤所示。

1.5.5 典型密封电池产品的型号、尺寸和特性

典型密封镉/镍电池的型号、尺寸和特性如表 6.9-3 所示，典型烧结式圆柱型密封镉镍蓄电池产品型号、尺寸和性能如表 6.9-4 所示，国产的典型全烧结式方形密封镉镍蓄电池产品型号、尺寸和性能如表 6.9-5 所示。

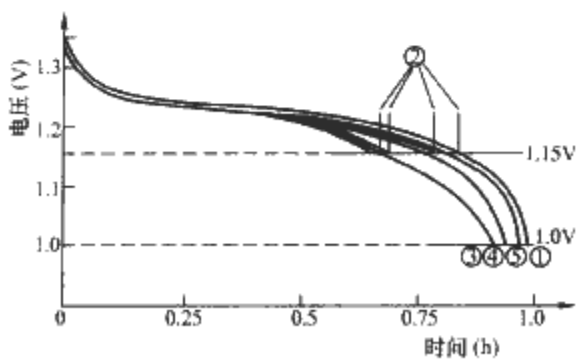


图 6.9-21 密封镉/镍电池循环中的电压下降现象（记忆效应）及其可恢复程度

表 6.9-3 典型密封镉/镍电池的型号、尺寸和特性

电池型号	容量 (0.2C, mAh)	最大尺寸 (mm) 直径	高	质量 (g)
圆柱形电池				
标准电池：充电标准，0.1C，14～16h；快充，0.3C，4～5h				
GNY0.17 (N)	170	12.0	29.3	9
GNY0.12 (AAAA)	120	8.0	42.5	6
GNY0.27 (AAA)	270	10.5	44.4	11
GNY0.65 (AA)	650	14.3	50.2	23
GNY0.55 (A)	550	17.0	28.5	19
GNY1.45 (SC)	1450	22.9	43.0	45
GNY1.55 (SC)	1550	22.9	43.0	47
GNY4.8 (D)	4800	33.0	61.1	145
GNY7.7 (F)	7700	33.2	91.0	230
GNY12 (M)	12 000	43.1	91.0	400
高容量电池：充电标准，0.1C，14～16h；快充，0.3C，4～5h				
GNY1.15 (AA)	1150	14.3	50.3	24
GNY1.55 (A)	1550	17.0	43.0	31
GNY2.4 (SC)	2400	22.9	50.0	58
GNY5.4 (D)	5400	33.2	59.5	150
GNY25.5 (M)	25 500	43.1	146.1	700
急充电池：充电标准，0.1C，14～16h；快充，0.3C，4～5h；急充，1.5C，1h				
GNY0.55 (A)	550	17.0	28.5	19
GNY2.0 (SC)	2000	22.9	42.9	56
GNY3.2 (C)	3200	26.0	50.0	84
GNY4.3 (D)	4300	33.0	59.5	160
高温电池：充电标准，0.1C				
GNY0.65 (AA)	650	14.3	48.9	23
GNY1.65 (SC)	1650	22.9	43.0	49
GNY3.1 (C)	3100	26.0	50.5	78
GNY4.5 (D)	4500	33.2	59.5	145
GNY7.7 (F)	7700	33.2	91.0	230
GNY12.0 (M)	12 000	43.1	91.0	400
耐热电池：充电标准，0.1C，14～16h；快充，0.3C，4～5h				
GNY0.65 (AA)	650	14.3	50.2	23
GNY1.8 (SC)	1800	22.9	42.9	56
GNY2.2 (C)	2200	26.0	50.0	80

说明：高容量电池——采用泡沫镍正极、涂膏式负极、薄壁电池壳等可增加电池容量。

急充电池——电池可在 1h 内快速完成充电。

高温电池——高温电池可在 35～45℃下进行充放电循环。

耐热电池——耐热电池可在高温下快速充电，例如在高达 45～70℃的温度下也可以 0.3C 充电。

表 6.9-4 典型烧结式圆柱形密封镉镍蓄电池产品型号、尺寸和性能

型号	标称电压 (V)	额定容量 (mAh)	外形尺寸 (mm) 直径	高	重量 (g)	循环寿命 (次)	充电电流 (A)
GNY0.8	1.2	800	14.5	50.5	26	>1000	0.1C_5～1C_5
GNY1		1000	17.0	50.5	40		
GNY1.5		1500	22.5	42.5	55		
GNY2		2000	26.0	50.5	85		
GNY4		4000	33.0	60.5	185		
GNY7		7000	33.0	90.5	250		

表 6.9-5　国产的典型全烧结式方形密封镉镍蓄电池产品型号、尺寸和性能

型号	标称电压(V)	额定容量(Ah)	外形尺寸(mm) 长	宽	高	重量(kg)	循环寿命(次)	壳体	充电电流(A)	放电电流(A)
GNFC10	1.2	10	80	28	145	0.5	>800	塑料	0.1～1C_5	25C
GNFC20—1	1.2	20	80	28	208	1.0	>800			
GNFC20—2	1.2	20	80	32	238	1.1	>800			
GNFC40	1.2	40	80	45	238	2.0	>800			
GNFC10	1.2	10	70	26	120	0.5	>1000	不锈钢		
GNFC20	1.2	20	76	29	165	0.91	>1000			
GNFC30	1.2	30	76	29	205	1.4	>1000			
GNFC80	1.2	80	142	142	260	4.0	>10 000			

2　氢镍电池

氢镍电池是常被人们称为半个镉/镍电池(镍正极)加上半个燃料电池(氢负极)构成的可充电电池。其正极活性物质为 NiOOH 和 $Ni(OH)_2$；负极为 Pt 催化的氢电极(活性物质为 H_2)；电解质是氢氧化钾水溶液。因此，它属碱性蓄电池中的一个电化学体系。由于 H_2 在电池中呈气体状态，故内部压力很高，最高可达 5～10MPa(具体压力值首先由设计确定)，因此该电池又称为高压氢镍电池。鉴于氢气极易泄漏，而且这种电池目前主要用作空间飞行器(卫星等)的长寿命储能电源，因此电池必须采用全密封结构(严格气密性)。电池在最后密封前，可以设定负极活性物质 H_2 过量，或者正极活性物质 NiOOH 过量，前者叫正极容量限制设计，后者叫负极容量限制设计，简称正限制或负限制。第一代氢镍电池是正限制电池，电池有很好的过放电保护机理，后来开发出负限制电池，贮存性能更好，但没有过放电保护机理，两种设计电池正常工作的电化学反应相同。

2.1　工作原理

氢镍电池的反应原理如下

$$\text{正极}\quad NiOOH+H_2O+e \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Ni(OH)_2+OH^-$$

$$\text{负极}\quad 1/2H_2+OH^- \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} H_2O+e$$

电池总反应

$$NiOOH+1/2H_2 \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Ni(OH)_2$$

$$2OH^- \longrightarrow 1/2O_2+H_2O+2e$$

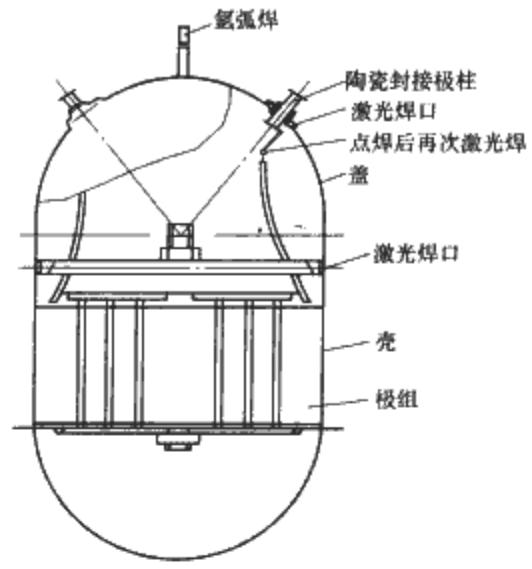
正极上产生的氧扩散到负极上，在 Pt 催化剂作用下，可立即快速发生复合反应，即

$$1/2O_2+H_2 \longrightarrow H_2O$$

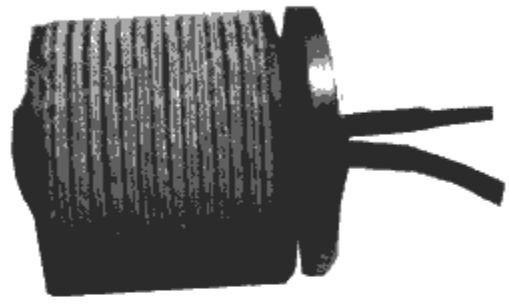
可以看出电池满充电时，内部的压力最高。过充电时虽然继续发生水的电解，并生成氢气和氧气，但氧气能迅速迁移至负极，在 Pt 催化剂催化下立即转换回水。这样保证了内压处于设计值内；同时电池过放电时，氢在正极析出，但可扩散到负极，进行还原反应而消耗。这就是氢镍电池过充电和过放电自保护机理，它既保证了电池的安全，又保证了电池的长寿命。

2.2　电池结构

氢镍电池结构如图 6.9-22 所示，电池外壳是个两端呈半球形的压力容器，由高强度镍基合金制成。



(a)



(b)

图 6.9-22　氢镍电池的典型结构图
(a) 电池结构；(b) 电极堆结构

2.3　电池分类

目前氢镍电池有四种类型产品。

(1) IPV 电池：独立容器电池，电压 1.2V，每个容器里只有一只电池。

(2) CPV 电池：共容器电池，每个容器里有两个极组串联，电压是 1.2V 的两倍。

(3) SPV 电池：一个电池组共用一个压力容器，电压为电池组设计电压。

(4) DPV 电池：一个电池一个容器，但容器的大面相互靠紧，相互支撑组成电池组的电压为电池组设计电压。

2.4　电池应用

氢镍蓄电池当今已广泛用于同步轨道 (GEO) 和低轨道 (LEO) 卫星。氢镍电池与镉/镍电池相比质量比能量高，可达 60Wh/kg；可以深放电使用，在同步轨道卫星中，设计放电深度可达 70%～80%DOD，而使用寿命可至 15 年以上。

3　金属氢化物/镍电池

金属氢化物/镍电池（简称金属氢化物电池或写成 Ni/MH 电池）是 20 世纪 90 年代投放市场的新型碱性可充电电池。它与传统的镉/镍电池具有良好的互换性（标称电压 1.2V)，用电器具无需更改，即可采用金属氢化物电池替代镉/镍电池。金属氢化物电池与镉/镍电池相比，具有长的工作时间（以相同电流放电时，同尺寸电池的工作时间是一般镉/镍电池的 1.5～2 倍)，而且电池采用储氢合金材料替代有毒物质镉，消除了“镉污染”，被誉为“绿色电源”。

这种电池是在储氢合金材料取得重要技术突破的基础上问世的，其中 $LaNi_5$ 的储氢性能特别引起了电化学界的关

注，人们试图将其用作储氢电极材料，发展实用的 Ni/MH 电池。然而由于这种合金材料储氢后，体积增加较大，导致在反复吸放氢过程中，合金严重粉化，使材料比表面不断增加，从而增大了合金氧化的速度，最终使合金失去吸放氢能力。这种现象在电极充放电过程中表现尤为明显，以致于用这种储氢合金材料试制 Ni/MH 蓄电池的尝试未能成功。

直至 1984 年，又是菲利浦实验室公布了他们对这种材料的最新研究结果，发现将 $LaNi_5$ 中 Ni 用部分 Co 和 Al 取代，La 用部分 Nd 取代，则构成了 $La_{0.7}Nd_{0.3}Ni_{2.5}Co_{2.4}Al_{0.1}$ 的新合金，其保持了 AB_5 的晶体结构特征，但吸氢后的体积膨胀却由 $LaNi_5$ 的 24.3%降至 14.3%，这一新发现对研究实用化储氢电极合金指出了方向。1985～1989 年间，材料界和电池界都投入大量人力和物力，发展实用化储氢合金电极材料和 Ni/MH 蓄电池技术。1989 年，日本首先实现了储氢合金材料和 Ni/MH 的生产和应用。1990 年日本三洋公司率先向市场推出了第一个 AA 型金属氢化物/镍电池产品，容量为 1100～1200mAh，是同尺寸镉/镍电池的近 1 倍（当时烧结式 AA 镉/镍电池容量为 600mAh）。接着日本几家大电池公司先后实现了该电池的产业化生产，1996 年 AA 型密封圆柱 Ni/MH 电池的年产量就达到了 3 亿只，与有近 100 年历史的镉/镍电池生产量基本相当。我国“八五”期间在国家“863”高技术计划的推动下，储氢材料和 Ni/MH 电池技术取得突破，先后建成了 Ni/MH 电池的生产中试线、生产和研制基地。我国有丰富的稀土元素资源，日本生产储氢合金的原料也基本来自我国。

目前金属氢化物/镍电池已广泛进入普通消费电池市场，可用于袖珍收录装置、电动剃须刀、便携式 DVD、摄像机和电动玩具等；同时可用于对讲机、电动工具和各种军用电台等作电源；此外，金属氢化物电池在电动自行车和混合动力汽车上也已开始得到应用，并展现了一定的应用前景。

3.1 工作原理

Ni/MH 电池的电化学原理与高压氢镍电池相似，区别是负极的活性物质不是氢气而是从金属氢化物中释出的氢原子，电极反应可以用图 6.9-23 的示意图和相应的反应方程式来表示。图 6.9-23 的左边是金属氢化物负极，右边是氧化镍正极，中间的上部是氢离子（质子）由正极移向负极的充电过程，中间的下部则是氢原子向正极移动的放电过程。

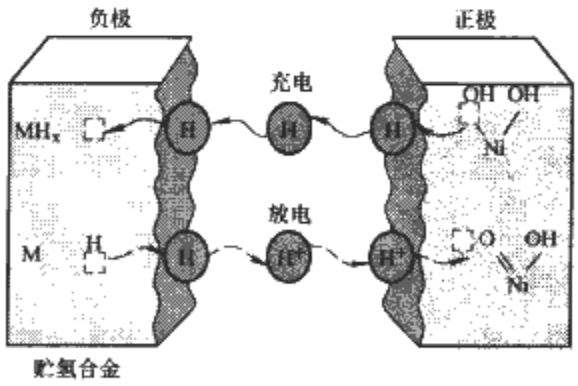


图 6.9-23 金属氢化物/镍电池的电化学反应原理示意图

电池反应式如下

正极反应 $NiOOH+H_2O+e \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Ni(OH)_2+OH^-$

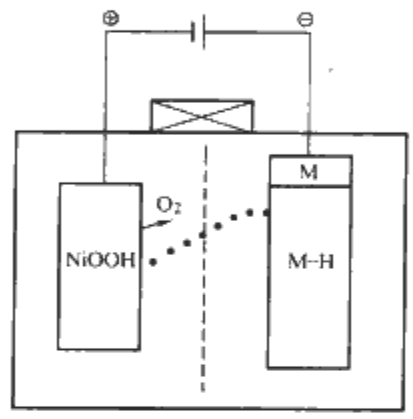
负极反应 $MH+2OH^- \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} H_2O+M+e$

电池总反应 $NiOOH+MH \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Ni(OH)_2+M$

其中正极上的反应与镉/镍电池正极反应完全相同；而负极反应与高压氢镍电池的负极反应类似。

放电时负极里的氢原子转移到正极成为质子，充电时正极的质子转移到负极成为氢原子，电液的组成不变，也不产生氢气。在电池中储氢合金的作用首先是吸收充电时产生的氢气，生成金属氢化物，由此将气态氢贮存在固态金属合金的晶格中。这样的储氢形式可以电池内部压力降得很低（正常情况下为 0.3～0.6MPa），因此不需要像高压氢镍电池那样昂贵的压力容器外壳，故常称它为低压氢镍电池。储氢合金的第二种作用是代替 Pt 作氢的阳极氧化电催化剂，有利于提高负极的放电率。

事实上在金属氢化物/镍电池中，金属合金中氢总是与氢气处在一定的压力平衡状态，也就是说必须保持一定的压力，氢在合金中才是稳定的。由此这种电池只能设计成密封电池。而且也像镉镍密封电池一样，应该有氧循环的机制。其工作原理类似于镉/镍电池，如图 6.9-24 所示。



(1) 正极反应 $4OH \rightarrow O_2+2H_2O+4e$

(2) 负极反应 $O_2+2H_2O+4e \rightarrow 4OH^-$

$\left(MH+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow M+\frac{1}{2}H_2O\right)$

图 6.9-24 密封金属氢化物/镍电池的氧循环原理示意图

在设计中一般将负极容量设计成是正极容量的 1.5 倍左右，当充电时，正极先达到满充电状态，而析出氧气，产生的氧气像密封镉/镍电池中的形式一样，会穿过隔膜达到负极反应，最后产物回到水，如图 6.9-24 中的反应式所述。由此也使负极多数情况下不会达到满充电状态而析出氢气，如图 6.9-24 的 MH 电极上部的 M 标志所示，表明负极总有继续储氢的位置。据此，就可以制造成密封电池。

3.2 电池结构

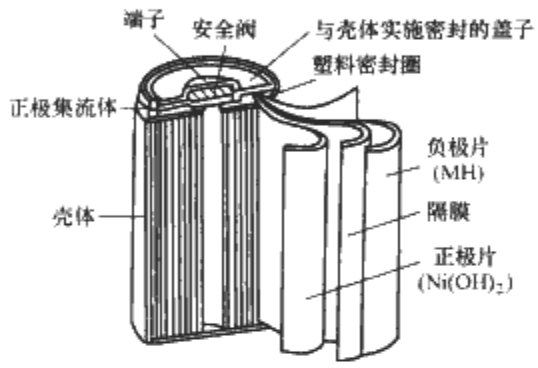
金属氢化物/镍电池与镉/镍电池的正极、隔膜、电液、壳体、盖子相同，只是用金属氢化物电极取代了镉电极作负极。因此，金属氢化物/镍电池也有密封圆柱和方形两种，其结构与 Ni/Cd 电池相近，分别如图 6.9-25（a）和（b）所示。值得指出的目前大部分金属氢化物/镍电池的正负电极同用泡沫镍制造，单位体积的获得的容量最高。参照图 6.9-25，可以对电池的主要组成作出进一步说明，如表 6.9-6 中所列。

表 6.9-6 密封 Ni/MH 电池的主要组成

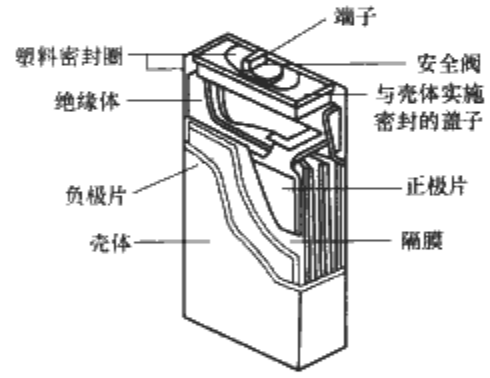
主要组成	各组成的相应说明
正极片	以球形氢氧化镍为活性物质与其他添加材料等构成的薄形极板

续表

主要组成	各组成的相应说明
负极片	以储氢合金为活性物质与其他添加材料等构成的薄形极板
隔　膜	大多采用合成纤维无纺布隔开正负极，同时用以吸收与保持电解质溶液
电解质溶液	采用以氢氧化钾为主要成分的水溶液
壳　体	镀镍钢带冲压成型，并作为负极的端子
电池盖组件	由绝缘垫圈、正极端子和安全阀三部分构成。其中绝缘垫圈为橡胶件，不仅使正、负极绝缘，而且受压后，保证电池壳体与盖子间密封不漏液
安全阀	当电池内压一旦异常上升时，能尽快将气体排出到电池外部，并且它可恢复到原来状态



(a)



(b)

图 6.9-25　密封金属氢化物/镍电池的典型结构图（剖面）
（a）圆柱形；（b）方形

3.3　关键材料、关键部件及电极的工艺

3.3.1　储氢合金

金属氢化物/镍电池得以问世就在于发展出适合电池需求的新型储氢合金材料，它是制造该电池的关键材料。在电池中储氢合金在充电和放电过程中，伴有吸氢和放氢反应，并涉及电极表面电化学及体相扩散过程。特别是在大电流或高温工作时，储氢电极对电池的综合性能有着极为重要的影响。一般对用作 Ni/MH 电池负极材料的储氢合金提出下述要求：

（1）电化学可逆储氢容量高。

（2）合金氢化物的平衡氢气压力适中（25℃时，一般在 0.01～0.1MPa 之间）。

（3）对氢的阳极极化具有良好的催化作用。

（4）合金在碱性电解质溶液中具有良好的抗氧化、抗腐蚀能力。

（5）合金在循环充放电过程中不易发生粉化。

（6）合金具有良好的导电、导热性能。

（7）原材料易于获得，且加工成本低廉。

目前，用作储氢合金电极材料有二类合金，即 AB_5 型合金和 AB_2 型合金。AB_5 合金为稀土系合金，考虑到降低成本的需要，经过优化材料组分后，已用混合稀土取代了单一元素 La 或 Ce。用作储氢电极的 AB_5 型合金材料的典型组分为：$MmNi_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3}$ 和 MmBx，其中 x＝4.55～4.76，B＝Ni、Co、Mn 和 Al。用作储氢电极的 AB_2 合金（即钛镍系合金）的典型组分为 $Ti_{16}Zr_{16}V_{22}Ni_{39}Cr_7$ 和 $Ti_{17}Zr_{16}V_{22}Ni_{39}Cr_7$。

至今大多数电池制造商都采用稀土系储氢合金材料制造 Ni/MH 蓄电池的负极，它的比容量一般为 280～330 mAh/g，易于活化，可以采用一般拉浆工艺制造电极。在电池中配合泡沫镍正极，可使电池自放电率低于 25%，循环寿命超过 500 次（100%DOD，1C 充放电，$-\Delta V$ 和温度控制）。

但美国 OVONIC 公司则采用 TiNi 系储氢合金材料研制大容量电动车辆用 MH－Ni 蓄电池。其材料电化学比容量可高达 360～400mAh/g。但材料表面易于氧化，须要合适的活化处理；电极制造采用氢还原保护气氛中的烧结工艺、设备及操作比较复杂。此外，采用这种材料的电池自放电较高和高倍率放电性能较差。

3.3.2　球形氢氧化镍

在研制和生产新型 Ni/MH 电池的初期，不少制造商都沿用生产镉/镍电池用的烧结式正极，这种正极的体积比容量最佳值约为 400～450mAh/cm³，因此限制了 Ni/MH 电池的容量提高。以 AA 型电池为例，烧结式正极电池的额定容量仅能达到 1100～1200mAh。高孔隙率泡沫镍和纤维镍材料（孔隙率高达 95%以上，比烧结镍基体高出 15%以上）的出现，提供了可以填充更多活性物质的空间，但是由于传统制备的 β－$Ni(OH)_2$ 的振实密度只有 1.6g/cm³，在泡沫镍中的填充量依然不能达到最佳值。经过努力终于制备出高密度球形 $Ni(OH)_2$，其典型参数如表 6.9-7 所列。可以看出其振实密度高达 2.2～2.3g/cm³。当使用这种材料在泡沫镍基体中进行涂覆时，极大地提高了基体中活性物质的载量，从而显著提高电极的体积比容量，如氧化镍正极的比容量可达 550～600mAh/cm³。

表 6.9-7　高密度球形 $Ni(OH)_2$ 的主要参数

粒度，D50（μm）	6～8
振实密度（g/cm³）	2.1～2.2
初始比容量（mAh/g）	280～290
放电电压①（V）	0.33～0.35

① 模拟电极放电，1C 放电至 30min 时，相对 Hg/HgO 参考电极电压。

在对碱性镉镍和金属氢化物/镍电池中的 $Co(OH)_2$ 充放电行为研究中发现，如果加入少量 CoO 会大大改善电极的充放电效率。其作用机理是 CoO 通过与碱作用生成 $Co(OH)_2$ 沉积到正极表面，再转换成具有良好导电性的 CoOOH，显著提高电极反应的可逆性和反应速度。进一步研究又发现，在高密度球形 $Ni(OH)_2$ 表面上可以直接包覆一层 $Co(OH)_2$，由此可以减少正极材料配方中添加 CoO 的比例，从而使正极比容量得到进一步提高。采取这些新材料的电池新产品，使 AA 和 AAA 电池额定容量提高到 2000mAh 和 800mAh。比初期上市的电池容量提高了

近 80%。

3.3.3 泡沫镍基体及泡沫镍电极制造工艺

目前，我国已成为世界上最大的连续泡沫镍基体生产地，其中包括我国著名的力源公司和加拿大 INCO 在中国设立的公司。其生产工艺流程为：

聚氨酯泡沫塑料（控制孔率和尺寸）→预涂复导电层或化学镀镍→电镀镍层→高温燃烧将塑料分解成 CO_2→还原气氛（H_2）中燃烧除去表面氧化物层和碳层→产品。泡沫镍产品典型参数列于表 6.9-8 中。采用泡沫镍作基体的典型电极制造工艺流程如下：



表 6.9-8 泡沫镍的典型参数

宽度（mm）	460（最大）					
厚度（mm）	1.6±0.1					
孔数（PPI）	65～70					
孔径（μm）	300～400					
单位面积质量（g/m^2）	500±35					
孔率（%）	93～96					
耐碱性	20%KOH 溶液中浸泡 24h，重量不变，Ni 不溶解					
拉伸强度（N/cm^2）	100～200					
杂质含量（10^{-6}）	N	O	C	Fe	Cu	Co
	20	60	50	55	<10	<1

3.4 工作性能

Ni/MH 电池的物理参数，尺寸、质量和外观完全可与镉/镍电池互换，其充放电特征也基本一致，只是自放电与寿命不如镉/镍电池，但也能在深充电循环时达到 500 次循环寿命。与镉/镍电池相比，同尺寸 Ni/MH 电池的容量高，比能量高。如 AA 型密封圆柱电池，镉/镍电池容量现在可以达到 0.7～1.0Ah，而 Ni/MH 电池的容量可以达到 1.8～2.2Ah，近来又提高至 2.4Ah；更重要的是电池中不含环境污染的有害金属镉。由此新型 Ni/MH 电池已经被认为是镉/镍电池的换代产品，将会逐步在各种相关应用领域置换传统的镉/镍电池。为此在本节中，对该体系在使用中的典型的性能等给予了较为详细的介绍，并且在大多情况都以最普遍应用的圆柱形 AAA 电池为例加以说明。

3.4.1 充电特性

采用的充电电流，充电时的环境温度以及电池所处使用状况的不同，对金属氢化物/镍电池进行充电时所表现的充电电压特性也将有所不同。图 6.9-26 表示出 AAA 型密封 Ni/MH 电池的典型充电特性，由图 6.9-26（a）看出，随着充电电流的增大，电池的电压升高，这是由于伴随着电极反应，电池的内阻和电极极化（欧姆内阻＋化学反应阻抗）增加而引起的。由图 6.9-26（b）则看出，充电时温度越低，电池的充电电压越高；温度越高，电池的充电电压越低。充电电流为

0.1CmA＝2100mAh÷10h＝210mA

由于金属氢化物/镍电池的充电反应是一个放热反应，从充电初期电池温度即开始逐渐上升；另外当电池满充电后，充入的电量将通过氧气的复合反应间接转变为热量，所

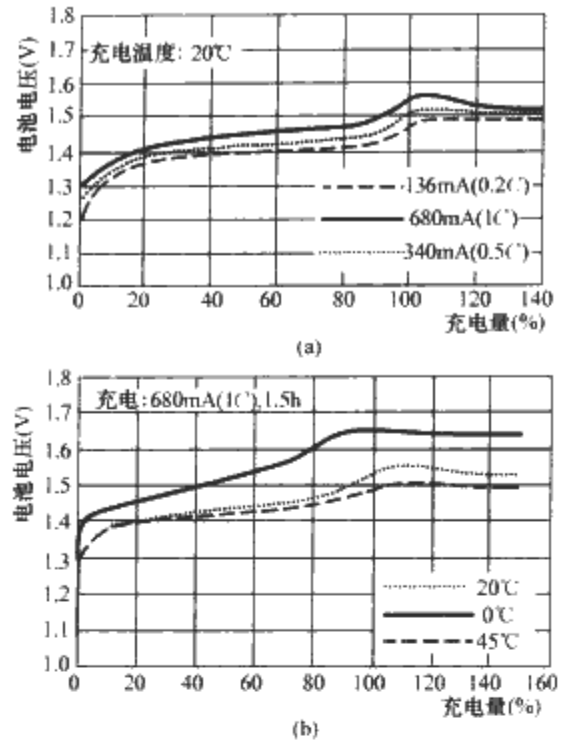


图 6.9-26 AAA 型 Ni/MH 电池以不同充电倍率和在不同温度下的典型充电曲线
（a）20℃条件下；
（b）680mA（1C），1.5h 条件下

以电池温度的上升速度会加快，如图 6-9.27 所示。在 Ni/MH 电池中，造成内部温度上升的主要因素为：

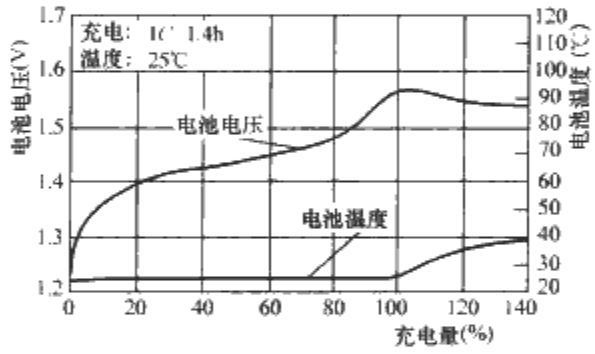


图 6.9-27 AAA 型 Ni/MH 电池在较大电流充电时的充电曲线与温度上升特征曲线

（1）充电电流与充电电量。

（2）电池型号。

（3）电池组的规格（形状，电池数量）。

（4）充电时的环境温度（环境温度与通风性）。

一般情况下，推荐在常温（25℃左右）下充电为宜，同时在进行充电条件设定时要考虑到电池的放热。

3.4.2 放电特性

图 6.9-27 是 AAA 型 Ni/MH 电池在较大电流充电时的充电曲线与温度上升特征曲线，金属氢化物/镍电池的典型放电曲线如图 6.9-28 所示，曲线显示在以 1C 以下电流放电时，电池在 1.2V 左右时会显示出比较平坦的放电平台。随

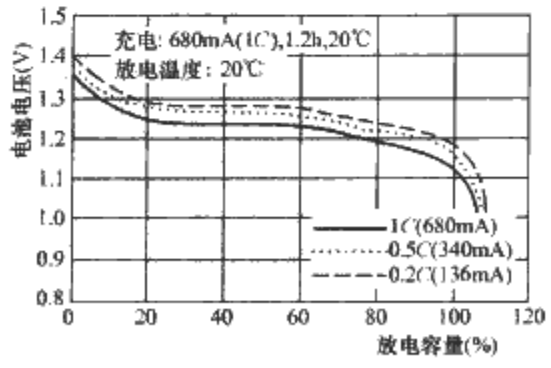


图 6.9-28 AAA 型 Ni/MH 电池在不同放电倍率下的典型放电曲线

着电池放电倍率（放电电流值）的增加，放电电压和放电容量也会有所下降，主要是由于放电电流增大时，电极反应的活化极化增大，同时浓差极化和欧姆极化也会增大，由此造成电池的电压下降幅度变大和放电容量下降。放电电流（高放电倍率下）与放电容量的关系如图 6.9-29 所示。根据电池的型号，环境温度等不同，放电情况也有所不同。若使用超过 3CmA 的电流进行放电，放电电压将会很快下降，所以一般应使用 3CmA 以下的电流进行放电。此外，随着充放电循环次数的增加，电池的内阻将有所上升，在使用较大电流放电时则会由于电压的下降而不能得到足够的放电容量。因此，一般都推荐以 1CmA 以下的电流放电，既可得到稳定的电压平台，又可确保获得较长的循环寿命。

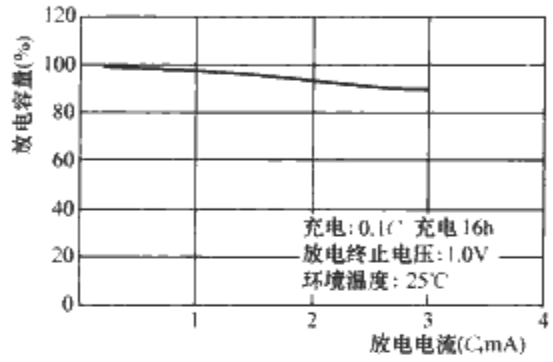


图 6.9-29　AAA 型 Ni/MH 电池的高倍率放电特性

金属氢化物/镍电池的放电容量和环境温度的典型关系如图 6.9-30 所示。由图看出金属氢化物/镍电池可以在－20℃～60℃较宽阔的温度范围内正常工作，但是环境温度会影响电池放电时的电压和放电容量。从图 6.9-30 可以看出特别是在低于 0℃的低温环境下，1CmA 电流放电时容量下降已十分显著，所以在这种情况下使用时应特别注意。

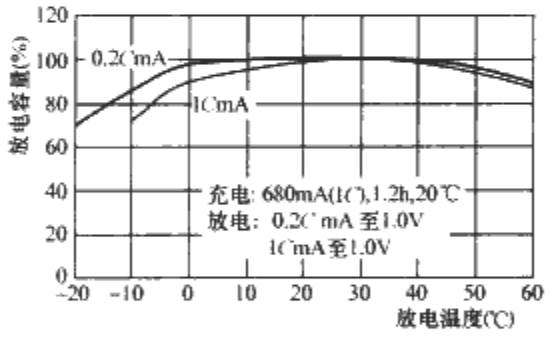


图 6.9-30　AAA 型 Ni/MH 电池在不同温度下的放电特性

3.4.3　贮存特性

金属氢化物/镍电池贮存温度和容量保持能力之间的关系如图 6.9-31 所示。显然，Ni/MH 电池的自放电对较高的贮存温度格外敏感。电池在高温环境下贮存时由于储氢合金的氢分压增高，会加快自放电的速度。同时在高温环境下长期放置，将发生绝缘垫圈，无纺布隔膜等有机材料的老化和变形，对于电池而言，这是一种不利的因素。若电池需搁置 3 个月以上时，建议将电池保存在有利电池组分稳定的较低温度环境下（－20℃～30℃）。

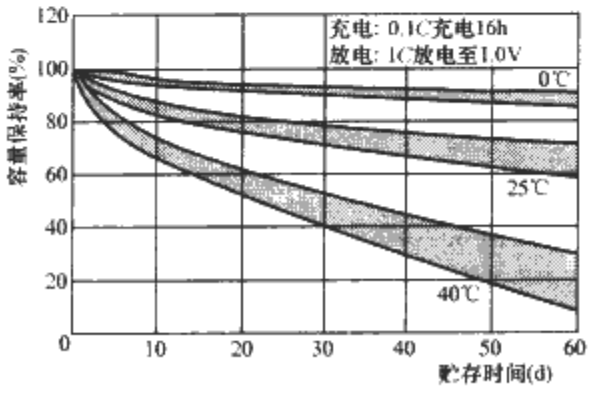


图 6.9-31　圆柱形密封金属氢化物/镍电池在不同温度下的荷电保持能力

一般来说，长期贮存（无论充电态或放电态）对金属氢化物/镍电池的容量不会造成永久性损坏。也就是说自放电造成的容量损失是可逆的，通过充电就可以恢复全部容量。如图 6.9-32 所示，2～3 个充放电循环后电池容量即全部恢复。其中（a）充电态下贮存一个月（b）放电态下贮存一个月，电池充放电条件同图 6.9-30。

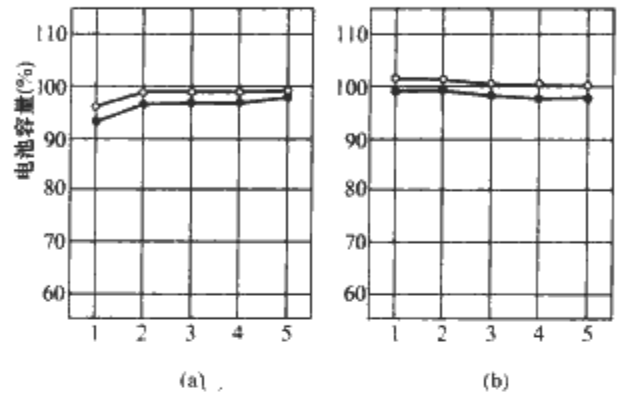


图 6.9-32　圆柱形密封金属氢化物/镍电池贮存后的容量恢复能力

（a）贮存后循环周期数（充电状态下）；

（b）贮存后循环周期数（放电状态下）

为了更充分地发挥电池特性，特别推荐在贮存时要注意以下几点：

（1）在温度－20℃～30℃，湿度 65%±20%的环境下贮存，不要让电池表面产生露点。

（2）电池在长时间贮存时，必须断开负载。

（3）电池在长时间贮存后，使用前一定要进行充电；而且一般需要通过几次小电流的充放电后，才可能恢复几乎全部容量。

3.4.4　循环寿命特性

通常情况下在经过反复充放电后，电池的放电容量会有一定的降低。循环寿命的测试方法通常以 IEC 标准或国家标准为依据，当电池的放电容量仅为原始容量的 60%时，则定义该电池循环寿命终止。一般情况下金属氢化物/镍电池的循环寿命都可以超过 500 次。

金属氢化物/镍电池到达寿命终止的主要原因是用以保持电解液的隔膜干涸和内阻的增加。电解液的干涸是由于电池内部各组成部分的变化和气体排出装置（安全阀）的动作引起的。

金属氢化物/镍电池的充放电循环寿命和电池容量的关系如图 6.9-33 所示。

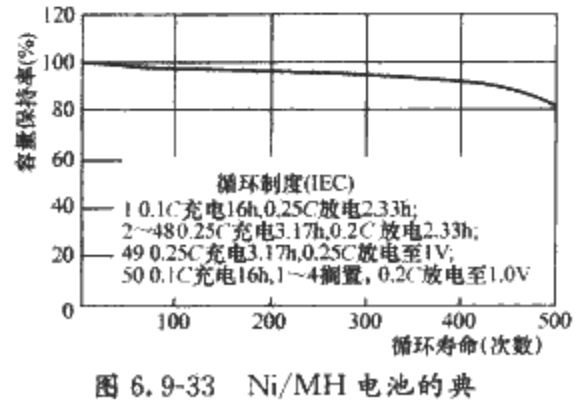


图 6.9-33　Ni/MH 电池的典型循环寿命特性

决定金属氢化物/镍电池寿命的主要因素有：

（1）工作温度，一般推荐金属氢化物/镍电池在 0～40℃温度范围内使用。

（2）充电条件，一般推荐在规定的最大允许充电电流以下进行充电，并且务必不要过充电。这是因为如果电池遭到过充电，虽然负极能吸收正极产生的氧气，但是储氢合金将被氧化，由此导致负极性能的下降。因此，反复过充电时电池寿命将缩短。

（3）放电条件，一般推荐在适当的电流下工作，且不要过放电甚至造成电极反极，如图 6.9-34 所示电池的反极现象。与铅酸电池相比，尽管金属氢化物/镍电池耐过放电能力强的多，但是如果反复进行如图 6.9-34 所述之极性逆转的过放电的话，电池寿命就会大大缩短。

反极现象是当几只电池串联起来使用，并进行深放电时，串联电池组中容量较低的电池比容量较高的电池先发生电压下降，该电池先达到完全放电状态，若在此状态下继续进行放电，就会使容量较低的电池发生极性逆转（反极）。图 6.9-34 中区间（1）是正常放电区间；区间（2）之后是过放电时的极性逆转区间，在此区间中，正极达到完全放电状态，从而开始产生氢气，氢气积蓄在电池内部；在区间（3）中负极的放电反应结束，并开始产生氧气。显然当发生反极时，电池内部气体压力迅速上升，致使气体排出阀（安全阀）动作，带出电解质溶液，终究使电池受到损害。因此，设定放电终止电压时应注意，当达到电池电压设定值（通常为 1.0V/cell）时，要强制终止放电。

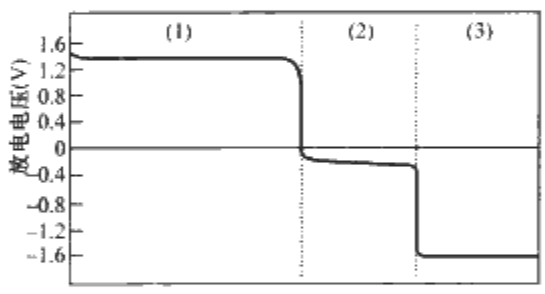


图 6.9-34 圆柱形密封金属氢化物/镍电池放电过程中的反极特征

金属氢化物/镍电池在进行数百次反复充放电后，充电电压会上升。而放电电压会变低。这种变化都是由于反复充放电，电池内阻显著增加造成的。

3.4.5 密封 Ni/MH 电池的记忆效应

当密封金属氢化物/镍电池重复进行不完全的充放电循环时，也会像密封镉/镍电池那样，出现可恢复的电压下降和容量减少现象，即常说的记忆效应。在图 6.9-35 中，电池先进行一次完全放电（循环 1）和充电，然后进行几次放电至 1.15V 后充电的循环，循环过程中放电电压和容量逐渐下降（循环 2～18），接着再进行一次完全放电（循环 19），可以看到此时的电压低于电池初始全放电（循环 1）时的电压。循环 19 的放电曲线表现出两个阶段，电池放电至初始终止电压时并没有释放全部容量。这种现象称作电压下降，由于电池似乎是记住了较低的容量，有时也称作“记忆效应”。经过几次完全充放电循环后，电池可恢复其全部容量，如图 6.9-35 中的第 20 周期和第 21 周期的曲线所示。发生电压下降的原因是在浅充电或部分放电过程中，仅仅一部分活性物质进行了放电和充电。未参与循环的活性物质的物理性质发生了变化，电阻增大。随后进行完全充放电循环可将活性物质恢复到初始状态。

电压下降和容量损失的程度取决于放电深度。放电至适当的终止电压可以避免上述现象的出现或使之最小化。若放电至较高的终止电压，如单体电池放电至 1.2V，则这种现象非常明显。当终止电压在 1.15～1.10V 之间时，这种损失较小。若终止电压低于 1.1V，则在随后的放电过程中不会出现明显的电压下降和容量减少。但是，放电终止电压也不能太低。记忆效应还与放电率有关。对于一个特定的放电终止电压，放电率越高和放电深度越小，参与循环的活性物质就越少，容量损失就会加大。

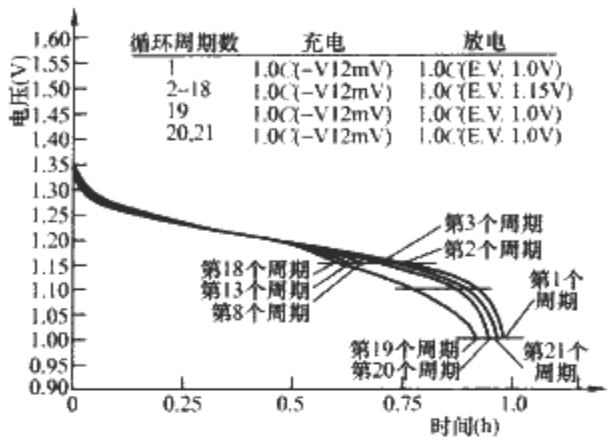


图 6.9-35 圆柱形密封金属氢化物/镍电池循环过程中的电压下降，温度 20℃

尽管记忆效应降低了电池性能，但实际的电压下降和容量减少只占电池容量的一小部分。绝大部分用户觉察不到密封金属氢化物/镍电池的记忆效应所造成的电池性能的下降，但却经常错误地用记忆效应来解释其实是由其他问题，如不完全充电、过充电或高温所造成的电池容量的减少。

3.5 充电方法和充电电路

充电是使放电后的电池再次返回可使用状态的过程，决定充电条件应先考虑电池的使用条件和电池的特性。虽然金属氢化物/镍电池在充电末期，正极产生的氧气可以被负极所消耗，但是负极吸收氧气的能力是有限的，由此决定了每个型号均有一个最大允许充电电流，藉以保持气体发生量和消耗量的平衡。由于气体消耗速度还受到温度的影响，因此，遵守充电温度规定是很重要的。

充电电池的充电方法有恒电流充电，恒电压充电，小电流充电，浮充电（Float）等。对金属氢化物/镍电池充电时，通常采用恒电流充电方式。并且一般推荐一种在确保充电控制精度的同时，能实现各种电池特性要求的充电制度，即以 0.5～1CmA 恒电流快速充电方式对金属氢化物/镍电池进行充电。推荐的快速充电方法的原理如图 6.9-36 所示。

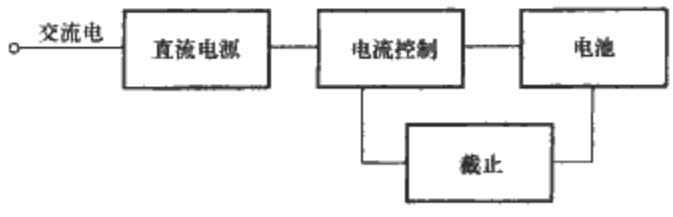


图 6.9-36 用于 Ni/MH 电池的快速充电示意图

该方法的重点在于以 0.5～1CmA 的恒电流进行充电，在满充电后，当电池电压变化量（$-\Delta V$）和电池温度上升速度到达一定值时对充电进行终止。快速充电的模式如图 6.9-37 所示，充电控制值的举例，如表 6.9-9 所示。

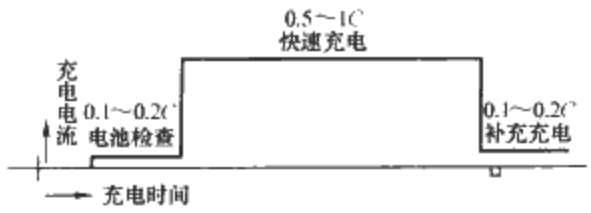


图 6.9-37　专用充电器的充电电流模式

表 6.9-9　　专用充电器的控制方式举例

充电区间	电流 (CmA)	控制功能			
		$\Delta T/\Delta t$	温度范围	电压范围	时间 (min)
电池检查	0.2	—	0～45℃	$(n-1)\times 1.35V$～$n\times 1.7V$	2
快速充电	1.0	1℃/分	0～40℃	$(n-1)\times 1.35V$～$n\times 1.7V$	70
补充充电	0.2	1℃/分	0～45℃	$(n-1)\times 1.35V$～$n\times 1.7V$	30

快速充电控制方式说明：

（1）温度微分控制方式（$\Delta T/\Delta t$）：是运用电池在达到满充电时温度上升变化这一原理的终止方法，如图 6.9-39 的最下部曲线所示。

（2）$-\Delta V$ 终止方式：当电池充电电压到达最大值后，电压会有所下降。该方式即为当电压下降到一定值时的终止方式，如图 6.9-38 的最上部曲线所示。金属氢化物/镍电池比起镉/镍电池的 $-\Delta V$ 要小，所以有必要将设定值降低。

（3）最大值截止方式：当电池电压上升达最大值时的终止方式，如图 6.9-38 的最上部曲线标出值所示。

（4）电压终止（V 切断）方式：充电时的电池达到一定电压值的终止方法。

由于伴随着循环充放电的进行，金属氢化物/镍电池的充电电压将上升，所以一般不推荐用电压终止方式对金属氢化物/镍电池进行充电控制。

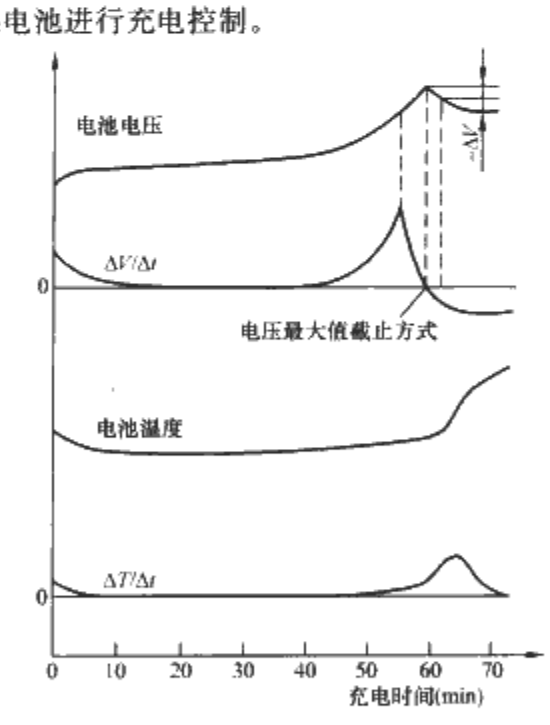


图 6.9-38　密封 Ni/MH 电池的充电控制原理

金属氢化物/镍电池的快速充电方式是要求在满充电时立即结束快速充电，为了尽量避免过充电，有必要规定电压和温度的测量精度和具体数值等。

3.6　金属氢化物/镍电池的应用及前景

3.6.1　在便携式电子与电器中的应用

表 6.9-10 列出了金属氢化物/镍电池在便携式电子与电器中的典型应用，而表 6.9-11 列出了小型金属氢化物镍电池典型产品的型号、尺寸和特性。鉴于该电池体系是绿色环保体系，又可以与普通同尺寸锌系列原电池和镉镍电池互换使用，因此，表 6.9-11 中列出的直接标准型号电池已经进入超市，顾客可以随意选购用于如表 6.9-10 中各种视频、音像、办公用品和通信电器等的用途。同时由表 6.9-11 可以看出密封圆柱形 Ni/MH 电池的性能近几年来进步迅速，AA 电池的容量已从最初的 1100～1200mAh 增加至 2200～2400mAh。应该特别指出我国的小型 Ni/MH 电池在前两年已达到世界产量第二位（年产近 2 亿只），而且是出口大国。其中，我国 BYD 公司曾成为仅次于世界最大的三洋公司的世界第二大 Ni/MH 电池制造商和出口商。今年以来，由于金属镍价格几乎翻了一倍，使我国的中小 Ni/MH 电池公司陷于困境，产量有下降趋势。

表 6.9-10　　金属氢化物/镍电池的典型应用

在便携式电子与电器中的应用	正在发展中的应用
1. 视频：8mm 录相机，液晶电视，数码照相机，便携式 DVD 2. 音响：立体声耳机，便携式 CD 随身听，便携式 MD 随身听 3. 办公室设备：小型计算机，袖珍复印机，笔记本计算机，袖珍打印机 4. 通信电器：手机、无绳电话，对讲机，PHS 5. 其他：各种便携式电器，电动剃须刀、电动玩具等	1. 动力电源 2. 电动工具 电动自行车 纯电动汽车（EV） 混合动力汽车（HEV 和 FEV）等

3.6.2　正在发展中的应用

由于 Ni/MH 电池的大电流放电性能不如 Ni/Cd 电池，因此原先期待的由 Ni/MH 电池全面取代 Ni/Cd 电池的计划尚不能实现。但是 Ni/MH 电池的技术和产品性能仍然在不断提高之中，已经有部分高功率型电池进入了电动工具应用市场。

20 世纪 90 年代以来，由于世界经济和科技的高速发展，世界发达国家汽车数量剧增，在大城市中引起的污染日益严重，美国以加州为代表，颁布了推动零排放汽车的计划，并以法律形式予以推动，按照加州 1992 年制定的车辆排放标准，1998 年零排放汽车销量比例应达到 2%；2000 年为 5%，2003 年则上升至 10%。由此极大地推动了世界上各大汽车公司对纯电动车的开发，90 年代中期分别推出了一些代表型的车型，如通用的“EV-1”、福特的“Think”城市低速电动车，丰田的 RAV-4 电动吉普车，德国本茨、法国雷诺、意大利菲亚特等都推出了各自的电动车型。目前各汽车公司开发的一些概念车虽然都未投入大规模生产，但许多国家都在一定的城市和区域，开展了对这些电动车的运行评估，例如法国、美国、德国和中国等都有一定的电动车示范区。从表 6.9-12 中对各种蓄电池体系所做的比较中可以看出，金属氢化物/镍电池是水溶液电解质体系中综合性能最好的体系（优于铅酸、镉/镍、铁/镍和锌/镍），而锂离子电池则是非水电解质体系中综合性能最优异的（优于钠/硫）。事实上各国政府和大的汽车制造商都曾对金属氢化物/镍电池进行了大量研究，并进行了包括装车的演示与评价等。例如日本丰田的 RAV-4EV 电动车就采用了 95Ah 的 Ni/MH 电池组（如表 6.9-13 中的数据所示），在我国汕头电动车示范区进行的电动车示范运行中，5 部丰田 RAV4EV 在汕头市区作为出租车运行，累计运行里程近 1 000 000km，平均比能耗为 25kWh/100km，其中一部行驶里程近 240 000km。

表 6.9-11 金属氢化物/镍电池典型产品一览表

IEC 型号	尺寸	电池特性		尺寸		重量 (g)	标准充电		快速充电	
		电压 (V)	标称容量 (mAh)	直径 (mm)	高度 (mm)		电流 (mA)	时间 (h)	电流 (mA)	终止 $-\Delta V$
HR11/4	AAA	1.2	600	$10.5^{+0}_{-0.7}$	44.5^{+0}_{-1}	12.0	60	16	600	0～10mV
HR11/4	AAA	1.2	700	$10.5^{+0}_{-0.7}$	44.5^{+0}_{-1}	12.5	65	16	650	0～10mV
HR11/4	AAA	1.2	750	$10.5^{+0}_{-0.7}$	44.5^{+0}_{-1}	12.8	68	16	680	0～10mV
HR11/4	AAA	1.2	700	$10.5^{+0}_{-0.7}$	44.5^{+0}_{-1}	12.8	65	16	650	0～10mV
HR11/4	AAA	1.2	750	$10.5^{+0}_{-0.7}$	44.5^{+0}_{-1}	12.8	70	16	700	0～10mV
HR11/4	AAA	1.2	800	$10.5^{+0}_{-0.7}$	44.5^{+0}_{-1}	12.2	75	16	750	0～10mV
HR11/4	AAA	1.2	700	$10.5^{+0}_{-0.7}$	44.5^{+0}_{-1}	12.8	65	16	650	0～10mV
HR11/5	AAA	1.2	800	$10.5^{+0}_{-0.7}$	50.0^{+0}_{-1}	15.4	75	16	750	0～10mV
HR11/2	2/3AA	1.2	600	$14.5^{+0}_{-0.7}$	29.0^{+0}_{-1}	14.0	60	16	600	0～10mV
HR15/5	4/5AA	1.2	1200	$14.5^{+0}_{-0.7}$	43.0^{+0}_{-1}	22.0	110	16	1100	0～10mV
HR15/5	AA	1.2	1600	$14.5^{+0}_{-0.7}$	50.0^{+0}_{-1}	26.0	150	16	1500	0～10mV
HR15/5	AA	1.2	1800	$14.5^{+0}_{-0.7}$	50.0^{+0}_{-1}	28.0	170	16	1700	0～10mV
HR15/4	AA	1.2	1600	$14.5^{+0}_{-0.7}$	49.0^{+0}_{-1}	26.0	150	16	1500	0～10mV
HR15/5	AA	1.2	2100	$14.5^{+0}_{-0.5}$	$50.5^{+0}_{-1.5}$	29.0	200	16	2000	0～5mV
HR15/5	AA	1.2	2200	$14.5^{+0}_{-0.5}$	$50.5^{+0}_{-1.5}$	31.0	220	16	2200	0～5mV
HR15/5	AA	1.2	2400	$14.5^{-0}_{-0.5}$	$50.5^{+0}_{-1.5}$	29.0	240	16	2400	0～5mV
HR22/4	Sub—C	1.2	2600	$22.3^{+0}_{-0.7}$	43.0^{+0}_{-1}	57.5	250	16	2500	0～5mV
HR22/4	Sub－C	1.2	3000	$22.3^{+0}_{-0.7}$	43.0^{+0}_{-1}	58.0	280	16	2800	0～5mV
HR26/5	C	1.2	3000	26.0^{+0}_{-1}	49.5^{+0}_{-1}	63.0	280	16	2800	0～5mV
HR33/6	D	1.2	3000	33.0^{-}_{-1}	$61.0^{+0}_{-1.5}$	76.0	280	16	2800	0～5mV
HR33/4	SD	1.2	4500	33.0^{+0}_{-1}	43.0^{+0}_{-2}	118.0	450	16	—	—
HR33/6	D	1.2	8500	33.0^{+0}_{-1}	$61.5^{+0}_{-2.5}$	160.0	800	16	—	—
HR33/9	F	1.2	13 000	33.0^{+0}_{-1}	91.5^{+0}_{-3}	250.0	1200	16	—	—

表 6.9-12 各种电动车候选蓄电池体系的比较

类 型	特 点	问 题	能量密度		功率密度	寿命	成本
			Wh/kg	Wh/L	W/kg	(循环次数)	
密封铅酸	功率密度大，可靠性好，便宜	比能量太低	35	80	200	400	低
镉/镍	功率密度大，可靠性好，便宜	成本较高、高温特性较差	50	110	170	500 以上	中等
金属氢化物/镍	功率密度大，比能量较高	成本较高、高温特性较差	65	155	200	500～1000	中等
铁/镍	负极活性物质便宜	充电效率低、自放电大、密封差	50	100	150	800～1000	中等
锌/镍	功率密度大，比能量较高	寿命较差	70	130	200	200～300	中等
钠/硫	功率密度大，活性物质便宜	高温工作（350℃），安全性差	100	100	150	～850	中等
锂离子	电压高、比能量高	成本较高、安全性较差，但正在解决中	120～150	200～240	200	500	较高

除纯电动车外，20 世纪 90 年代中期日本丰田推出了混合动力汽车 “Prius”，与此同时本田公司也推出了他们的商业混合动力车 “Insight”。自 1997 年上市以来，丰田的 Prius 生产量逐渐扩大，至 2000 年中期，已销售 45 000 台。2000 年 7 月开始向美国和欧洲销售，受到顾客的青睐。目前，美国和德国也在努力推出自己的混合动力车。其中，美国特别提出了发展 PHEV（Plug-inHEV）的目标，即所谓可以在汽车库接入插线板充电的混合动力车，由于单独充电，这种车可以用电池行驶 20mile（1mile=1.609 3km）以上距离。

实际上，丰田公司首先选择了金属氢化物镍蓄电池作为其 EV 和 HEV 的动力电池。其中用于其 RAV-4EV 和 E-

COM 电动车的是松下公司大容量方形金属氢化物镍蓄电池（95Ah 和 28Ah），而用于 Prius 混合动力车的是松下公司小容量方形高功率电池（6.5Ah），其电池组的主要性能列入表 6.9-13 中。

图 6.9-39 显示出丰田混合动力车的运行原理，电池可以通过驱动电动机运转汽车。电池用于启动、储蓄刹车回收的能量以及在加速时提供必要的辅助功率；燃油发动机既驱动汽车，又带动发电机给电池充电。这样可以让汽车总是工作在效率既高而又稳定的范围，提高了燃油效率（提高约 40%），且降低了污染排放。

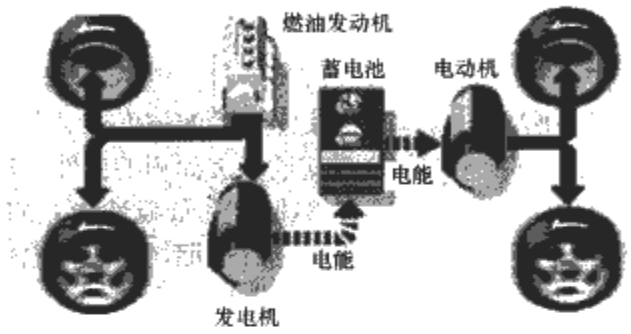


图 6.9-39　一种混合动力车的运行原理示意图

图 6.9-40 和图 6.9-41 分别显示出 Prius 混合动力轿车所使用的 Ni/MH 电池组照片和其典型的充放电功率特性。

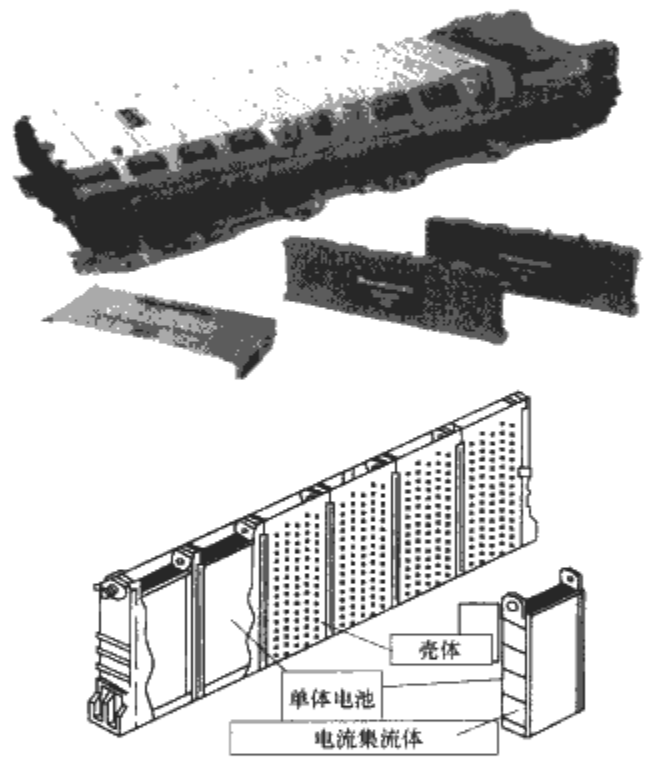
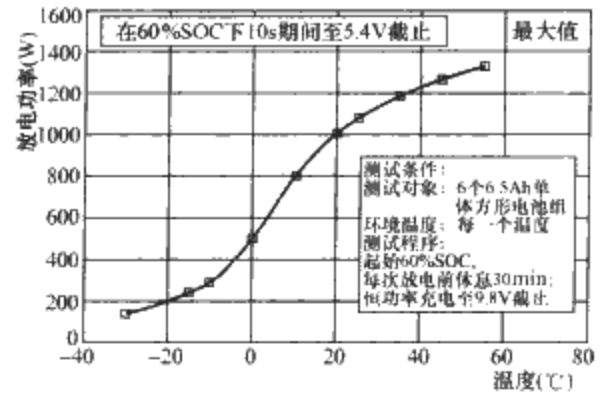


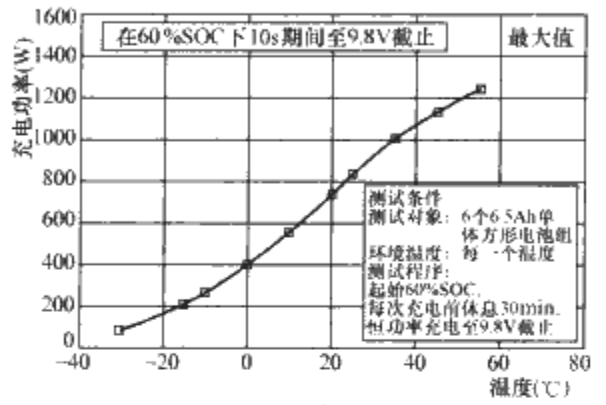
图 6.9-40　6.5AhNi/MH 电池组件（由 6 只共壁单体构成，见下图结构图）和电池包

由图 6.9-41 可以看出，该电池虽然容量很低，但是瞬时放电功率和充电功率非常高，在 60%SOC 和 20℃下分别可达 1000W 和 800W（10 内），由此可以满足车辆启动、加速或回收能量等的速度要求。目前本田公司的 HEV 也采用这种高功率、小容量 Ni/MH 电池组。

“十五”期间我国科技部将电动汽车作为 863 专项予以安排，并突出把 HEV 技术作为商业化前景的产品进行开发，而把 EV 和燃料电池 EV 作为新技术跟踪及为“2008”北京绿色奥运服务的重大项目予以安排。目前我国第二汽车公司研制的混合动力大轿车已小批量在武汉投入了 510 公交车专线运行，如图 6.9-42（a）所示。运行初步统计表明，这种 11m 长的混合动力公交车具有性能价格比优势，其实际最大速度为 80km/h，噪声降低 2dB，燃油节省约 20%。该混合动力车采用了我国神州电



(a)



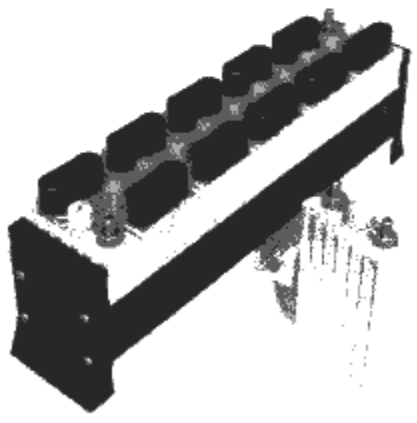
(b)

图 6.9-41　6.5AhNi/MH 电池组件的充放电特性

（a）放电功率特性；（b）充电功率特性



(a)



(b)

图 6.9-42　我国运行的混合动力公交车及其采用的电池组

（a）混合动力公交车；（b）40Ah 高功率 Ni/MH 电池

源公司制造的 40Ah Ni/MH 电池组，如图 6.9-42（b）所示。这种电池组的典型高倍率放电性能和循环寿命性能如图 6.9-43 所示。

同时目前国内外电动助力车，特别是自行车非常热门，而其中商品化车辆主要采用铅酸电池。但采用金属氢化物镍

电池与锂离子电池作动力的车辆也在增加之中。

表 6.9-13 日本丰田采用的 Ni/MH 动力电池参数一览表

类 型	RAV-4EV	E-com	Prius	New Prius
	密封型金属氢化物镍电池			
电压（V）	288（24 模块×10 单体）	288（24 模块×10 单体）	288（240 单体）	274（228 单体）
能量（kWh）	29	8.4	1.8	1.7
比能量（kWh/kg）	65	58	44	46
输出功率（kW）	85 在 80% DOD 和 240V 下	47 在 80%DOD 和 240V 下	21	34
功率密度（W/kg）	190	320	500	880
电池总重量（kg）	450	146	44	41

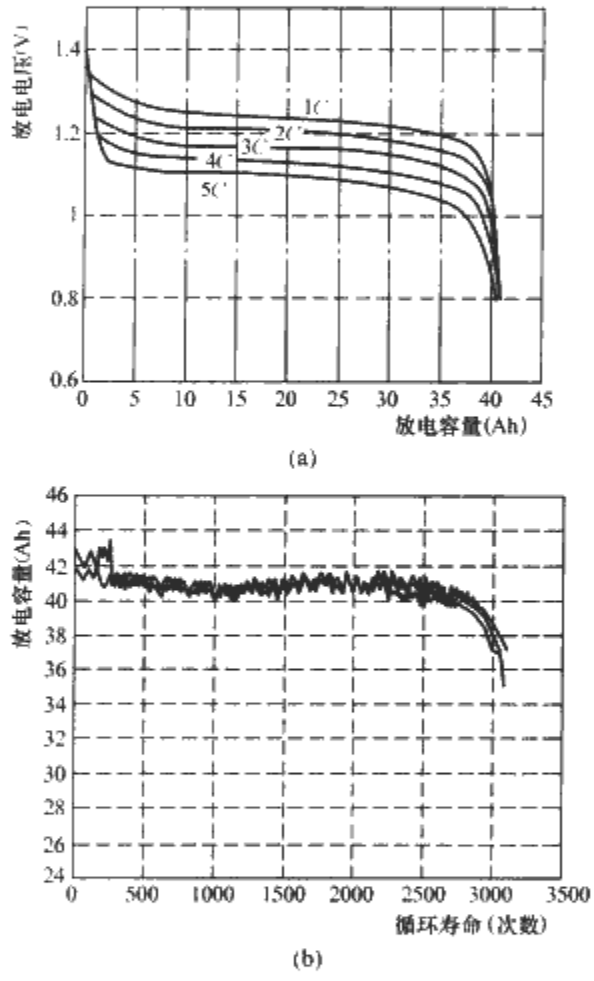


图 6.9-43 40Ah 高功率 Ni/MH 电池的典型性能
（a）放电性能；（b）循环寿命特性

4 铁镍蓄电池

早在 19 世纪末 20 世纪初，欧洲的 Junger 和美国的 Edison 就发明了铁/氧化镍蓄电池，这是一种以铁电极作为负极的碱性蓄电池。

4.1 工作原理

铁/氧化镍电池的负极活性物质为金属铁，正极活性物质为氧化镍，电解质为含有氢氧化锂的氢氧化钾溶液。总的电极反应结果是氧从一个电极迁移到另一个电极。从下面的一般反应式可以明显地看出，电解质没有参与总反应

$$Fe+2NiOOH+2H_2O\underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}}2Ni(OH)_2+Fe(OH)_2$$

然而电池中的负极发生的反应比较复杂，它可以经历两种价态的变化，如下式所示

$$3Fe(OH)_2+2OH^-\underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}}Fe_3O_4H_2O+2e$$

$$Fe(OH)_2+OH^-\underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}}FeOOH+H_2O+e$$

在上述反应式中可以看出，铁/氧化镍电池的负极上两阶段反应过程代表了铁的两种价态变化，即由 0 价（Fe）至 2 价（Fe^{2+}），再至 3 价（Fe^{3+}），显然在电池的放电曲线上也会出现两个电压平台。

铁电极反应虽然较复杂，但反应中间产物及其氧化物的溶解度都很低，由此形成了铁镍电池优异的循环寿命。放电时，电极近旁溶液中过饱和铁离子能在反应中心区附近形成细小的氧化物结晶。充电时，由于铁的溶解度低又会减慢铁的晶体生长，有利于恢复成最初的高表面积的活性结构。但低溶解度同时也是造成高放电率性能和低温性能差的原因，因为氧化物在表面沉积能遮盖了活性表面，形成铁电极的表面“钝化”现象。高性能铁/氧化镍电池采用了新型电极骨架，如金属纤维，这种多孔结构增大了导电骨架与活性物质铁的接触面积，从而使电极性能得到了大幅度提高。

4.2 结构与组成

4.2.1 典型结构

虽然现在已经发展了烧结式电极和泡沫镍或纤维镍电极技术，然而目前应用较多的依然是有极板盒式电极。图 6.9-44给出了有极板盒式铁/氧化镍电池的结构。活性物质填充在冲孔的镀镍钢袋中。将其固定到一定尺寸的端板上，然后将正负极板交错叠放组装成单体电池。电池外壳一般采用镀镍钢板制造，为了在组装成电池组时的彼此绝缘，钢制的电池外壳外表可涂覆一层塑料或橡胶，或者垫上绝缘垫，再放入塑料或木制的箱体中。

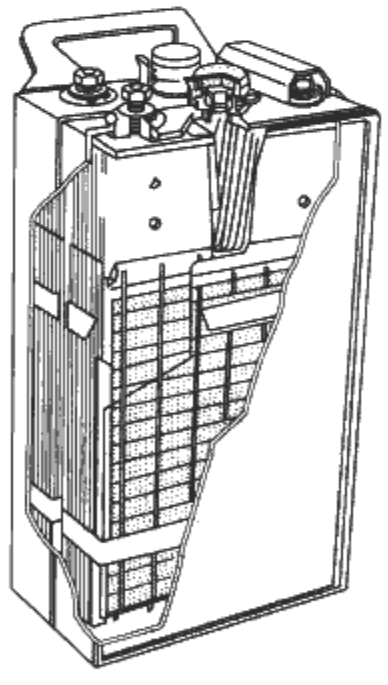


图 6.9-44 典型有极板盒式铁/氧化镍电池的剖面图

上述电池制造工艺已经沿用了五十多年基本上没有改变。为了获得电化学性能优良电极材料，人们开发出多种制造工艺，生产出的活性物质材料纯度很高，并具有特殊颗粒特性。

4.2.2 主要组成及电极典型制造工艺

负极活性物质为 Fe_3O_4 和 Fe。为了提高电池寿命，常

加入少量添加剂，如 S、FeS 和 HgO，这些添加剂起到活化剂的作用，同时能减少析气和提高导电性；正极活性物质由氢氧化镍构成（基本与镉镍电池类同）。有极板盒式电极的典型工艺流程如图 6.9-45 所示。

电池中采用的电解质为 25%～30%KOH 溶液，一般都要加入 LiOH（约 50g/L）；氢氧化锂的作用是可以提高电池容量和防止循环过程中容量衰减；而且可以延长有效的充电平台，从而延缓了氧气的析出。

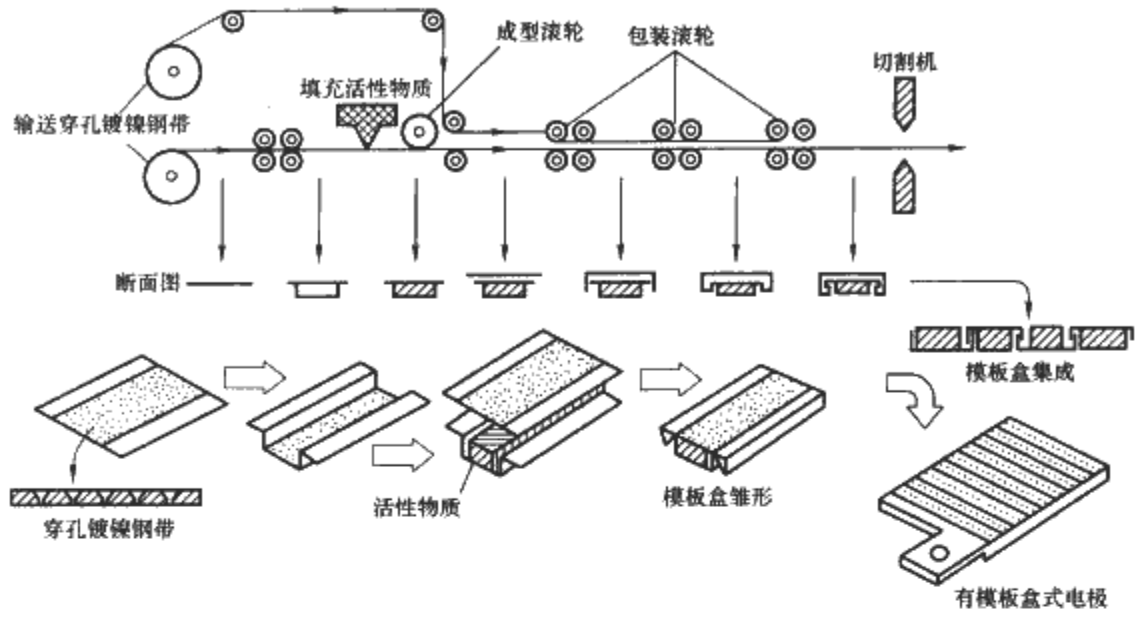


图 6.9-45　有极板盒式电极的典型工艺流程说明

4.3　工作性能

铁镍电池的开路电压为 1.4V，标称电压为 1.2V。在最常用的充电率下，最高充电电压为 1.7～1.8V，如图 6.9-46 所示。普通铁/镍电池的功率输出和体积比能量处于中等水平，使用时主要采用中低放电率放电。对于高放电率应用，如发动机起动，一般不推荐使用普通铁/镍电池。因为在高放电率下，电池较高的内阻将使电池的放电终止电压大幅度降低。该电池体系在不同放电率下的放电曲线如图 6.9-47 所示。总的来说，铁镍电池的放电电压平稳性远不如镉镍和金属氢化物镍电池，而且在 1h 率放电时的放电曲线上电压已十分倾斜。

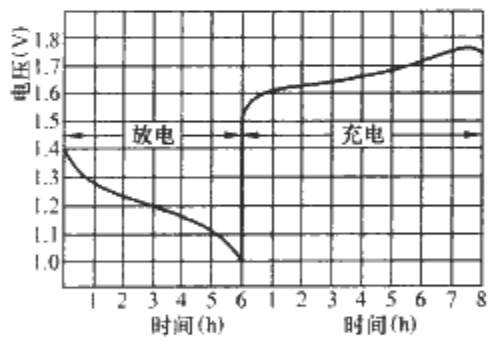


图 6.9-46　铁镍电池的典型恒电流充放电曲线

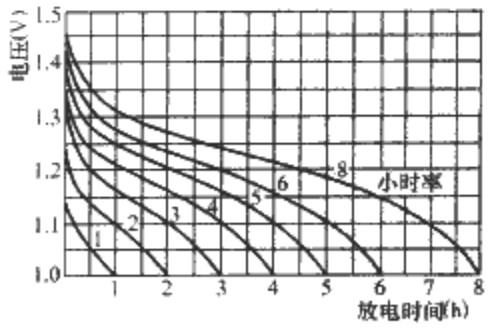


图 6.9-47　铁镍电池在不同放电率下的放电曲线

铁/镍电池的荷电保持能力和搁置后性能恢复能力都较差。25℃下，电池的容量在前 10 天内就可损失 15%，一个月后损失可高达 20%～40%。电池的自放电率随着温度的降低而降低，在 0℃下电池容量的衰减可低于 25℃下的一半。

有极板式铁/镍电池的突出优点是寿命极长、坚固耐用。电池的寿命与应用类型有关，若使用频繁，电池的寿命一般为 8 年，若是作为备用电源或浮充电使用，电池的寿命可达 25 年甚至更长。电池的使用条件若略加控制，电池的循环寿命就可以超过 2000 次。若严格控制使用条件，如将温度限制在 35℃以下，电池的循环寿命甚至可以达到 3000～4000 次。

4.4　电池产品尺寸与特性

表 6.9-14 列出了一些典型方形铁镍电池产品的尺寸和性能，这些电池可以用于材料搬运车、地下采矿车、矿灯、铁路车辆、信号系统和应急照明等用途。

表 6.9-14　典型的铁/氧化镍电池产品尺寸与性能

额定容量（Ah）	169	225	280	337	395	450	560	675
额定电流（5h 率，A）	34	45	56	67	79	90	112	135
质量（注液，kg）	8.8	10.8	12.9	15.3	17.4	19.5	24.3	28.6
安装质量（kg）	9.8	12.0	14.3	16.9	19.3	21.7	26.5	31.2
电解质质量（1.17kg/L，kg）	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.9	5.9
单体电池尺寸（mm）								
长	52	66	82	96	111	125	156	186
宽	130	130	130	130	130	130	135	135
高	534	534	534	534	534	534	534	534
电池组尺寸（mm）								
长								
2 个单体				265	295	321	343	343
3 个单体				376	421	460		
4 个单体	284	367	431	487				
5 个单体	346	448	545					
6 个单体	408	546						
宽	161	161	161	161	161	161	197	226
高	568	573	582	582	582	582	590	590

5 锌氧化银蓄电池

5.1 工作原理

锌/氧化银蓄电池的化学组成与锌/氧化银原电池是相同的，只是采用的电极形式与组成不同。一般锌银蓄电池由具有电化学活性的金属锌粉和氧化锌，通过涂膏等方法压制成负极板；用活性金属银粉压制成正极板和采用 30%～40% 的氢氧化钾水溶液电解质构成的一种碱性蓄电池。锌/氧化银蓄电池的电化学反应原理为

$$AgO+Zn+H_2O \underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}} Zn(OH)_2+Ag$$

然而，在碱性电解质体系中的氧化银电极充放电过程可分为两个步骤，从而使得它们的充放电曲线表现出两个电压平台。氧化银电极在较高电压（两价银的氧化物，AgO）平台上发生的反应可以表示为

$$2AgO+H_2O+2e \underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}} Ag_2O+2OH^-$$

在较低电压（一价银的氧化物，Ag_2O）平台上发生的反应可以表示为

$$Ag_2O+H_2O+2e \underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}} 2Ag+2OH^-$$

如上面表示的那样，这些反应都是可逆的。

5.2 电池结构和分类

锌/氧化银蓄电池有方形、螺旋卷绕形、钮扣式等构造。最常见的形状是方形电池。在电池中，多层隔膜缠绕着平板电极，将极板机械地隔开。所选的隔膜一般为复合隔膜，其中有能够阻止银离子向锌负极的迁移和锌枝晶向正极的生长的功能。最后形成正负极交错的极板群被装入有一定强度的塑料壳体内，典型的方型电池构造如图 6.9-48 所示。

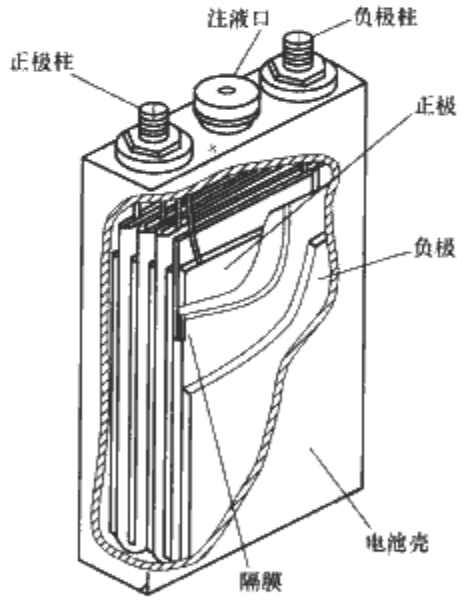


图 6.9-48 典型方形锌/氧化银蓄电池的剖视图

按照电池可使用的状态，锌/氧化银蓄电池可以制成干荷电式电池或干放电式电池两类。

5.2.1 干荷电式电池

干荷电式电池，又称干式荷电锌银蓄电池，即使用前电池中无电解质溶液，是干态的，而电极已呈荷电状态，一旦加注电解液浸泡片刻，便可接入负载使用。干荷电式锌银蓄电池的负极为活性金属锌粉与导网一起压制的极片，正极为高孔率氧化银极片，它是由金属银粉与导网压制成型（厚度一般为 0.4～0.9mm），再经化成处理得到的。当负极是用氧化锌为主要物质压制成型时，则需要将正、负两个电极一起化成后得到两个荷电态的电极来装配电池。使用中一旦电池容量耗尽，就可对电池再充电进行反复使用。这种电池大多数用于尖端技术装备和武器的配套电源，多数产品规定的使用充放电循环数为 5～10 次，湿寿命在 12 个月左右。也有少量电池在有维护的条件下进行常规使用，可将电池使用时的充放电循环寿命增至几十到几百次。

5.2.2 干放电式锌银蓄电池

干放电式锌银蓄电池，又称干式非荷电锌银蓄电池。使用前，电池中的两个电极是非荷电状态或放电态。电池加注电解液后，需按规定电流和终止电压进行化成，即进行充放电循环 1～3 次方可使用。按其使用方式，它又称为人工激活干式放电态锌银蓄电池。这种电池通常是采用滚压或涂膏方法将氧化锌与导网制成负极片；采用滚压或模压方法将金属银粉与导网压制成正极片。D 型锌银蓄电池电极厚度通常在 0.9mm 以上；C 型电池电极厚度在 0.5～0.9mm；G 型电池电极厚度在 0.3～0.5mm。为适应长寿命需要，隔膜一般为 3～4 层。这种电池多数是用于有维护条件的地面设备。因此电池的湿态贮存期较长（湿寿命），一般湿寿命在一年以上。充放电循环次数在（循环寿命）100～300 次，放电率在 5～20h。

5.3 工作性能

锌/氧化银蓄电池体系的开路电压为 1.85V 左右，标称电压为 1.5V。依据负载电流大小，工作电压可在 1.30～1.60 间变化。图 6.9-49 显示出锌氧化银电池的典型的充放电曲线，可以看出电池的典型充放电曲线上有两个电压平台，恰好代表了两价氧化银和一价氧化银的两步骤反应特征。而且，这种特征在低放电率下的充放电曲线上表现尤为明显［见图 6.9-49 上的曲线 1（充电）和曲线 2（放电）］。在高放电率下，高电压部分显著减少（见图 6.9-49 上的曲线 4）；同时也可采取其他手段来消除该电池的高电压部分（见图 6.9-50 上的曲线 3）。在这些情况下，可以使电池的放电电压更加平稳，以满足许多应用中的高电压精度要求。

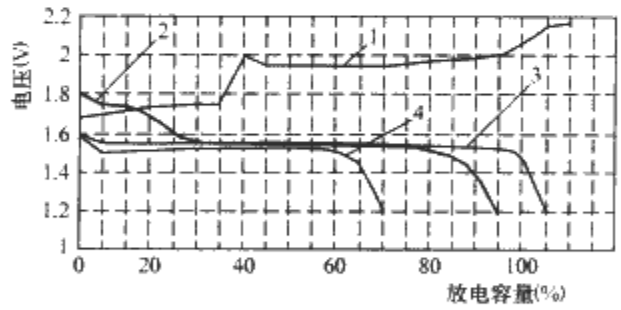


图 6.9-49 锌银蓄电池的典型充放电曲线

1—典型的充电曲线；2—低放电率下的放电曲线；3—消除高电压的放电曲线；4—高放电率下的放电曲线

事实上具有超高放电率能力（如图 6.9-50 所示）、放电电压平稳以及电池实际输出比能量高（取决负载电流大小，可达 70～200Wh/kg，是同等放电条件下镉镍蓄电池和铅酸蓄电池的 2～4 倍）是锌氧化银蓄电池的最大优势所在。由此使其至今依然广泛的应用于飞机、导弹、核武器、高低轨道的航天器、激光武器、鱼雷等水中兵器的配套电源。

但作为一种蓄电池，该电池体系的充放电循环和湿寿命都很短，一般高放电率电池为 10～30 次循环寿命和 3～6 个月的湿寿命，低放电率电池最长为 1.5 年和 300 多次充放电循环寿命；同时电池只适合在 15～50℃ 环境下工作，若要

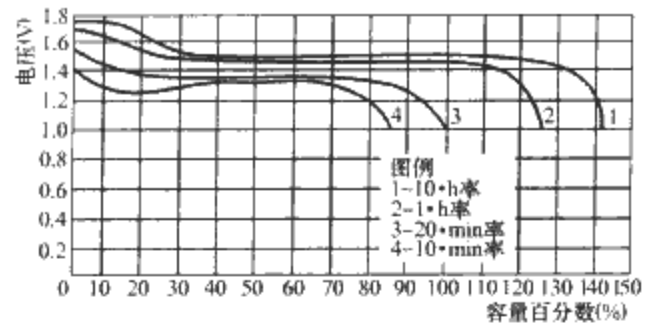


图 6.9-50　在 20℃下，锌氧化银电池以不同放电率放电时的典型曲线

求在低温下使用，必须采取加热措施。

设计为干荷电状态的电池，若采取合适的密封和贮存一般可以保持在长达 5～10 年内保持其荷电状态不变或很少变化。当然在贮存时一般首先推荐在较低的温度下贮存电池。

对干式放电态电池，电池激活并充电后的的荷电保持能力要比大多数其他蓄电池体系强，20℃贮存 3 个月后荷电保持率可超过 85%。同样与其他化学反应一样，荷电贮存期间的容量损失率也取决于贮存温度，一般在－20℃～0℃贮存可以得到最高的荷电保持率。

6　锌镍蓄电池

锌/镍（锌/氧化镍）蓄电池是将镉/镍、金属氢化物/镍电池中的镍电极与锌银电池中的锌电极集成在一起构成的。目前，根据具体的设计，锌/镍蓄电池的质量比能量为 50～60Wh/kg，体积比能量为 80～120Wh/L。锌镍蓄电池的优势主要由比能量高、原材料丰富、成本低、无环境污染。过去由于循环寿命较短，一直不能达到实用要求。但通过研究使锌电极循环性能得到一定程度改善。目前在有良好充电控制的前提下，电池以 100%放电深度（DOD）进行循环时，电池的循环寿命已可达 300～500 次；而当放电深度降低时，可高达几千个循环。由此，锌镍蓄电池可适用于作电动自行车、电动摩托车、草坪和花园用电动设备以及要求能进行深度放电循环的车、船的动力电源。同时对该体系性能提高的研究也在继续进行中。

6.1　工作原理

锌镍蓄电池的电化学反应原理是

$$2NiOOH+2H_2O+Zn\underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}}2Ni(OH)_2+Zn(OH)_2$$

按照上述反应，电池的开路电压 1.72V 左右。氢氧化镍活性物质的理论比容量为 289mAh/g，氧化锌的理论比容量为 659mAh/g。由此锌镍电池的理论比能量为 334Wh/kg，这一比特性使锌镍电池可以作为许多应用的候选电源。根据具体的设计，实际上锌镍电池在低倍率负载下的工作电压为 1.62～1.66V，在高倍率负载下工作电压为 1.40～1.50V，比能量为～70Wh/kg。这仅相当于理论值的 20%，可见锌镍电池体系还有进一步发展的空间。

此外如镉镍和金属氢化物镍电池一样，当电池过充电时，在正极上析出氧气，锌负极上析出氢气，氢气和氧气随之复合成水。另外，过充电期间正极上析出的氧气也可以在锌电极上和金属锌直接复合。如果电池过放电，正极上将析出氢气，锌负极上将析出氧气。

6.2　电池结构与组成

锌镍电池有多种结构设计，如方型、圆柱形。但目前的商业应用中主要是密封、免维护设计的方形结构电池，其典型结构如图 6.9-51 所示。

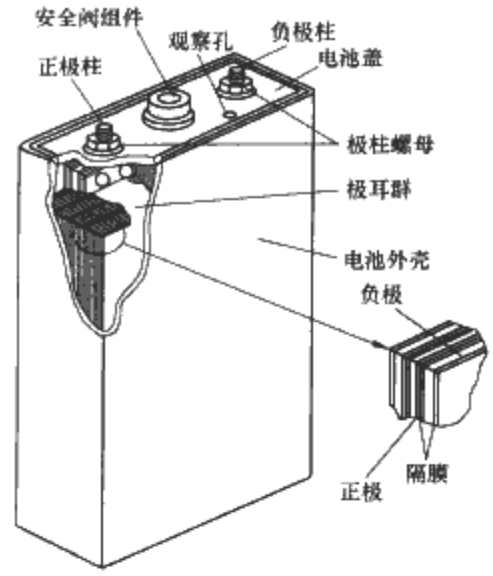


图 6.9-51　方形锌镍电池的典型结构图

与其他大多数采用氧化镍正极的碱性蓄电池一样，锌镍体系通常也采用正极（镍电极）限制，这意味着电池中的锌活性物质要多于氧化镍活性物质（以 Ah 计）。因此，在电池设计时除了要考虑活性物质各自的利用率外，还必须考虑两者的匹配。

电池中采用锌过量的设计出于多种考虑。首先由于锌在电解质中有一定的溶解度，因此电池中必须添加过量的锌来对此进行补偿；另外，电池中过量的放电态的氧化锌还可以最大程度上减小充电期间的析氢反应，因为锌电极通常达不到满荷电状态。此外，过量的金属锌可以与过充电期间镍电极上析出的氧气进行复合反应，由此实现电池的密封。

显然，锌镍蓄电池中的最关键的组成是氧化镍正极、锌负极、耐碱溶液隔膜和电解质，以下分别简要予以说明：

（1）氧化镍正极。虽然在镉镍和金属氢化物镍电池中采用的几种氧化镍正极形式，都可以在锌镍电池中进行应用，但是在近期发展的这种电池中都采用了塑料粘结式氧化镍正极。它是采用石墨复合结构，即采用高表面积的碳代替了烧结式电极和泡沫电极中的金属镍骨架，并采用聚四氟乙烯为黏合剂混合后滚压成型而得到连续的正极带。由于电极中的金属含量降低，因而电极成本降低，质量减轻。通过采用尖晶石钴盐对碳进行的处理，可以使石墨在电池内部强氧化性环境中的腐蚀得到控制。虽然电极采用石墨复合结构后内阻有所增加，但由于碳的表面积与镍粉或泡沫镍相比增大了很多，从而抵消了内阻增加的影响。另外用钴处理也能增强碳的导电性，因此这种电极能承受高倍率放电时的电流密度。塑料粘结式石墨复合镍电极的比能量为 140～150mAh/g，但由于石墨体积大于镍骨架，因此体积比容量较低。

（2）锌负极。锌电极有多种传统的制备方法，如干粉压制法、电沉积法和涂膏法。锌电极又可以分别制备成充电态电极或放电态电极。通常，充电态锌电极只应用于原电池中，而蓄电池通常采用的是放电态锌电极。与镍电极类似，锌电极也包含一个机械支撑/集流体，通常是由铜或镀银、镉或锌的铜材料制成，其形式可以是冲孔箔、延展金属片或编织网等。

锌在碱性电解质中部分溶解，是构成充放电过程锌电极形变和枝晶形成的原因。放电期间金属锌被氧化成正二价的锌离子，并以锌酸盐阴离子［如 $Zn(OH)_4^{2-}$］的形式溶解在电解质中。充电期间，电解质中的锌离子又被还原为金属

锌，重新沉积到电极上。由于锌不一定沉积到与原先的位置上，因此电极的“形状”发生改变。通常，锌趋向于迁移到电极底部的 1/3 处，使之变得更致密。这种局部致密化作用降低了锌的电化学活性，而且可能导致电池因短路而失效。与此相关的另一现象是锌枝晶的形成。锌电极的表面电流密度分布存在着一定的不均匀，锌便会优先选择在“高电流密度”点上沉积，逐渐形成所谓锌枝晶。它的生长最终可以刺穿隔膜，使电池发生短路。与前面讨论的镍电极相似，锌电极也可以采用塑料粘结法制备。将氧化锌干粉，PTFE 粘合剂以及其他添加剂与有机溶剂混合在一起，然后采用相似的辊压工艺对混合物进行加工处理。其中的 PTFE 原纤维化成纳米结构的三维纤维基体。新近制备出的锌酸钙电极结构，有利于活性物质被固定在电极结构骨架中，这种骨架有助于减小电极发生形变的趋势和枝晶生长。这是因为锌酸钙在碱性溶液中的溶解度比氧化锌小很多，而这正是锌镍电池的循环寿命得以提高的基础。

（3）隔膜。隔膜选择在提高锌镍电池循环寿命中也起到关键作用，为此通常采用多组分隔膜体系，以实现吸收电解质和阻止锌迁移的双重作用。由于锌酸钙电极的应用显著减小了锌枝晶的生成趋势，降低了电池对隔膜材料，尤其是对隔膜机械强度和抗穿透性能的要求。但是由于锌还有一定溶解度，隔膜阻止锌迁移的功能必须保持，甚至加强。

传统锌镍电池和锌银电池采用多层纤维素膜材料，但是直到选择了微孔聚丙烯膜（厚度通常为 0.025mm），才得到了较为满意的效果。由于聚丙烯本身呈憎水性，因此在溶液中应用时通常要用润湿剂进行处理。使用这种微孔材料必须多层叠加使用，由于各层上的孔通常不会正好都重叠在一条线上，因而便形成了曲折的人造通道，起到阻止锌酸盐离子的迁移作用。

（4）电解质。传统锌镍电池采用浓度为 31%～35%的氢氧化钾水溶液作为电解质，通常还加入 1%的氢氧化锂。高浓度的电解质可以降低纤维素膜材料的水解速率，但同时也会增大锌的溶解度，从而增加锌穿透隔膜的可能性。最近的研究表明，采用浓度为 20%～25%的氢氧化钾溶液作为电解质能够提高电池的循环寿命，如果同时采用低溶解度的锌酸盐电极效果更为明显。当电解质浓度低于 25%时，锌的溶解度大大降低，这将减少锌的溶解和迁移，使锌电极更稳定，从而提高了电池循环寿命。

6.3 工作性能

锌镍蓄电池具有高放电率能力和荷电保持能力强的特点，分别如图 6.9-52 和 6.9-53 所示。由图可以看出，该电池体系可以在高达 6C 放电率下连续放电，并获得较高的实际容量，只是电池电压有明显降低（终止电压取 0.95V）。因此它被推荐用于电动摩托车和电动割草机上作动力电源。

锌镍蓄电池的典型荷电保持性能如图 6.9-53 所示，显然电池电压在开始数天内呈快速下降，之后下降速度变得

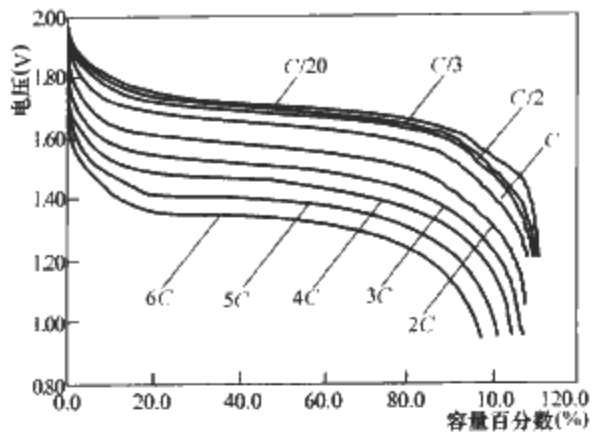


图 6.9-52 锌镍电池在不同放电率下的放电曲线

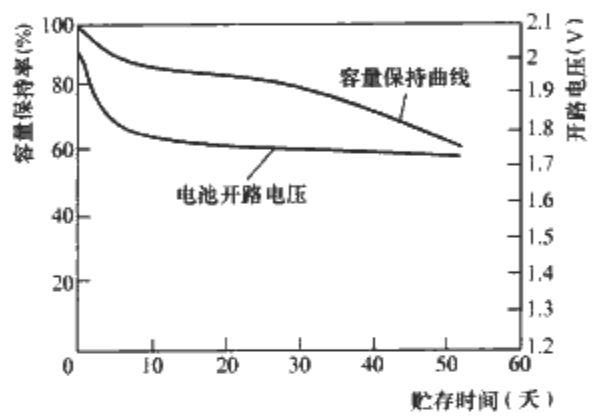


图 6.9-53 锌镍蓄电池在室温下的荷电保持率

非常缓慢。在 25℃下，满荷电态的锌镍电池以开路状态搁置一个月后，其容量损失为初始容量的 20%左右。若电池长期搁置，电压会降至 0V。在这种情况下，电池重新使用时，通常先需进行 3～4 个循环才能恢复其全部容量。与绝大多数电池体系一样，锌镍电池的自放电率也是随着温度的升高而增大。

与所有其他电池体系一样，锌镍蓄电池的循环寿命与电池的具体应用、环境条件、放电深度以及使用过程中的充放电制度密切相关。在一定的实验室条件下进行测试，放电深度为 100%时，循环寿命为 500 次；放电深度低至 10%时，循环寿命可达 10 000 次以上。对锌镍电池而言，进行正确的充电是确保电池获得最佳性能和循环寿命的一个关键因素。由于严重的过充电会加剧锌电极中锌的溶解与迁移，因此过充电不仅使锌镍电池的放电性能变差，而且会缩短电池的循环寿命。因此在充电系统的设计中，必须确定电池达到满荷电态的标志和采取有效的控制措施。用于进行锌镍电池充电终点的判断方法很多，其中包括电压/温度补偿、电压随时间的变化率、电池温度的升高或其他常用的一些技术。最常用的充电方法是恒电流/恒电压（CC/CV）两阶段充电制度。恒电流（CC）阶段的充电在达到一定的温度补偿电压时终止，恒电压（CV）阶段的充电在电流降到设定值以下或充电达到一定时间时终止。

第 10 章　锂蓄电池与锂离子蓄电池

锂蓄电池是采用金属锂或锂合金作负极的可充电电池的总称。属于这一范畴的有以下三类电池：

（1）锂有机电解质蓄电池，如 Li/V_6O_{13} 蓄电池（电解质为 $LiPF_6$/PC＋ME）、Li/MoS_2 蓄电池（电解质为 $LiPF_6$/PC＋DME）、Li/MnO_2 蓄电池（电解质为 $LiPF_6$/PC＋DEC）。

（2）锂合金熔盐电解质蓄电池，如 $LiAl/FeS_2$ 蓄电池（电解质为 LiCi-KCl 共熔体，工作温度（350～450℃）。

（3）锂聚合物电解质蓄电池，如：Li/VO_x 蓄电池（工作温度 60～80℃）。

锂离子蓄电池则是正、负极材料皆为锂离子嵌入式材料构成的电池（包括聚合物锂离子蓄电池），如 $C/LiCoO_2$ 蓄电池（电解质为 $LiPF_6$/EC＋DEC）、$C/LiNi_{1-x}Co_xMO_2$ 蓄电池（电解质为 $LiPF_6$/EC＋DEC）和 $C/LiMn_2O_4$ 蓄电池（电解质为 $LiPF_6$/EC＋DEC）等。

由于锂蓄电池和锂离子电池的共同特点是具有高电压（3V 和 4V 体系）和高比能量（100～200Wh/kg）。同时两种体系的正极和电解质体系相近或可以是相同的，而且锂离子电池是在锂电池技术基础发展起来的。因此在许多实际场合仍然将锂蓄电池和锂离子电池通称为锂蓄电池或可充电锂电池。

由于金属锂是金属中最轻的元素，且其电极电位为－3.045V，是金属元素中最负的一个元素，因此用它作为电池负极材料一直受到最为广泛地关注。实际上早在 20 世纪 50 年代末提出的新型锂电池研究计划，就是针对未来航天需要开展高比能量锂蓄电池作为起步的。然而当时选择的高电位正极活性物质，诸如 CuF_2、NiF_2 和 AgCl 等无机物正极材料在有机电解质中极易溶解，以致无法构成一个有长贮存寿命和长循环寿命的实用化电池体系。1970 年前后，随着对嵌入化合物的研究进展，科学家发现锂可以在 TiS_2 和 MoS_2 等嵌入化合物的晶格中嵌入或脱嵌，并提出了嵌入反应理论。利用这一原理，美国埃克桑公司制备了扣式 Li/TiS_2 蓄电池，而加拿大莫利公司接着推出了圆柱型 Li/MoS_2 蓄电池。其中后一种电池曾于 1988 年前后投入了规模生产及应用。但这种电池应用为时不长，由于电池在使用着的对讲机中突发短路引起过热，烧伤了用户面颊，致使公司决定收回所有售出的电池，并停止了这种电池的生产。技术分析表明，电池中的平板式锂在电极充放电过程形成树枝状沉积，挤破隔膜引起电池短路是引起上述安全事故的原因。此后，日本几家大电池公司分别向市场推出了一系列锂蓄电池，但都是小尺寸硬币型电池，只能用于手表和存储器的长寿命备用电源。1990 年以色列塔迪兰公司曾推出了安全型 Li/MnO_2 圆柱形蓄电池，并在军队的通信设备上进行了应用，但在锂离子电池问世之后，也逐步退出了市场。但是目前对高比能量锂/硫液体电解质电池和锂聚合物电解质全固态蓄电池体系的研究依然在进行中。不少学者把它们看成未来理想蓄电池的希望。

在锂蓄电池发展应用进程中遇到安全问题受阻时，1990 年日本索尼公司宣称，他们采用了能够使锂离子嵌入和脱嵌的碳材料代替金属锂作负极，具有脱嵌和可逆嵌入锂离子的高电位氧化钴锂正极材料和与正、负极材料都能相容的 $LiPF_6$－EC＋DEC 电解质，终于研制出新一代实用的新型锂离子蓄电池。目前用于小型锂离子电池的负极材料仍然以碳体系为主导，其中小型电池中大多采用人造石墨（典型为 MCMB）或经过适当处理的天然石墨。正极材料大多为锂钴氧化物 $LiCoO_2$，还有开始得到应用的尖晶石 $LiMn_2O_4$ 正极材料和氧化镍锂部分镍取代的衍生产物。此外还有 $LiFePO_4$ 正极材料也在发展与应用之中。

1　锂蓄电池

室温锂蓄电池已经进入市场，但使用场合十分有限，一般采用锂—铝合金负极的扣式电池可主要用于低功率移动场合，在这些场合下充电很方便，有时是采用太阳电池充电。采用金属锂的小型圆柱电池早在 1980 年代上市，用于消费电子用途，但是随着安全问题的发生就退出了市场。中温和高温下工作的锂蓄电池也受到重视，它们是针对电动车发展而研制的，但至今尚未取得实用化进展。

1.1　锂蓄电池体系分类

锂蓄电池体系可以分为液体有机电解质体系、液体无机物电解质体系、聚合物电解质体系和高温熔融盐电解质体系四类。

液体有机电解质电池使用金属锂作负极，液体有机惰性溶液作电解质和过渡金属化合物（氧化物、硫化物和硒化物）作正极。所选择的过渡金属化合物是插入或嵌入化合物，当放电和充电时可使锂离子分别进入或移出的结构，电池反应如下式所示

$$xLi+M_zB_y \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Li_xM_zB_y$$

其中，M_zB_y 代表过渡金属化合物。

聚合物电解质锂蓄电池是由金属锂、聚合物电解质和氧化物或硫化物正极构成的可充电电池。这种电池组成与结构可以使电极很薄，面积很大，保证电池有高的能量和较高的功率输出。目前采用聚合物电解质与金属锂负极相匹配，既可保持锂电池高比能量的特点，又可避免锂在液体电解质中的安全问题，同时还可能延长循环寿命。由此，各国都把聚合物锂蓄电池作为锂离子电池之后的一个新目标加紧研究，试图将蓄电池的比能量从目前的 120～150Wh/kg 提高到 200Wh/kg 以上。

液体无机电解质电池是以 SO_2 基的无机电解质，它具有高的离子电导率，从而使采用该电解质体系的锂蓄电池显示高倍率充电与放电的能力，并由此受到极大关注。该体系另外一些优点包括高比能量、低自放电率、接受限定过充电与过放电的能力和有一个宽广的电化学电压窗口（相对锂 5.0V）。体系的缺点是电解质的毒性和需要关注的安全问题，以及高的容量衰降率和低温容量相对较低等。

有几种类型电池曾经得到研究，它们都采用 SO_2 基电解质（以 $LiAlCl_4$ 为溶质）和金属锂负极，使用的正极材料

可以选择碳或 $CuCl_2$。

当使用高表面积碳材料和 SO_2 基 $LiAlCl_4$ 电解质时，证实碳与电解质形成的络合物可能参加电池的充放电过程，如下式所示

$$3Li+LiAlCl_4\cdot 3SO_2+xC \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} LiClAl\begin{cases}OSO\\OSO\\OSO\end{cases}C_x+3LiCl$$

聚合物电解质电池是使用一层锂离子导电聚合物膜既作电解质又起到隔膜作用的电池，由于这种电解质对锂反应性较低，而且不存在易蒸发与可燃的有机溶剂，故可使电池的安全性优于液体有机电解质电池。在这些电池中，负极通常是一片很薄的金属锂箔；而正极为过渡金属氧化物或硫化物，譬如 V_2O_5、TiS_2 或 VO_x 等。一般是将上述正极活性物质与碳以及聚合物电解质相混合，再压制在金属箔集流体上，形成电池的正极。电池的基本结构可表示为

$$Li/PEO\text{-}Li_r/M_xB_y,\ PEO\text{-}Li_r,\ C/M^*$$

此处 M_xB_y 是嵌入化合物，$PEO\text{-}Li_r$ 是聚合物电解质，而 M^* 是电流集流体。其化学反应表达式与上述液体有机电解质中完全一样。

由于大多数固体聚合物电解质的离子电导率都比液体电解质显著的低，因此电池设计必须采用尽量薄的电极和其他组分，使电池内阻最低化。由此，一般的电池装配总厚度可以低到 200μm 或更薄。另一种选择是在更高的温度（如 80℃）下操作，在这种较高的温度下电导率是较高的，可以适用开发用作电动车辆的电池和备用电源。对许多小型消费电子用途它们是不合适的，由此发展了采用塑化或胶凝型聚合物的较新型聚合物电解质，它们使电解质的室温电导率提高，但由于含有有机溶剂却使其与锂负极的反应性增大，影响到电池的循环和贮存稳定性。

熔融盐电解质电池是采用熔融盐作电解质的锂电池，通常电池的负极为锂合金，如锂－铝合金；正极为金属硫化物多孔电极，如 FeS_2；随使用的熔融盐电解质成分的不同，电池的工作温度范围在 375～500℃间。高温下使用熔融盐电解质可以获得高的比功率，这主要是因为在高温下熔融盐电解质具有很高的电导率和快速的电极反应动力学过程。由方形电池设计转向双电极电池设计可以降低电池的阻抗，从而可以进一步提高锂合金/金属硫化物电池的功率特性。

熔融盐电解质电池在研究过程中应用了冷压成形的 FeS 和致密 FeS_2 正极片，两种成分的锂合金[(α＋β)Li-Al 和 $Li_5Al_5Fe_2$]负极片，和含富 LiCl 的低熔点 LiCl-KBr-LiBr / MgO 电解质隔膜片。与电解质隔膜片成分相同的材料也被加入到了正极和负极材料中。Li/FeS 电池和只使用其高电压平台的 Li/ FeS_2 电池的电化学反应分别为

$$2Li\text{-}Al+FeS \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Li_2S+Fe+2Al$$

$$2Li\text{-}Al+FeS_2 \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Li_2FeS_2+2Al$$

这两个反应的理论比能量分别为 460Wh/kg 和 490Wh/kg。对应于这两个反应的电压分别是 1.33V 和 1.73V 左右。

自 1991 年起，美国先进电池协会（USABC）选择了双电极熔融盐 LiAl/ FeS_2 电池作为发展电动车电池技术的一个长期项目。尽管 1995 年底在此方面取得了明显地进展，但最终由于锂离子电池和聚合物电解质锂电池技术的迅猛发展而取消了它的继续研发。

1.2 特定的锂蓄电池品种及其特性

1.2.1 液体有机电解质电池及其特性

锂/硫化钼（Li/MoS_2）电池 Li/MoS_2 体系曾经是 20 世纪 80 年代世界上第一个投入生产的锂蓄电池，生产的产品为 AA 尺寸圆柱电池。在这种电池中使用了金属锂箔负极（125μm），其用量超过约 3 倍的电池放电容量；正极活性物质 MoS_2 是涂复在铝箔（150μm）上；电池是采用卷绕式结构，如图 6.10-1 所示，电解质是 1MliAsF$_6$ 在 50∶50 碳酸丙稀酯与碳酸乙烯酯混合溶剂中的溶液。

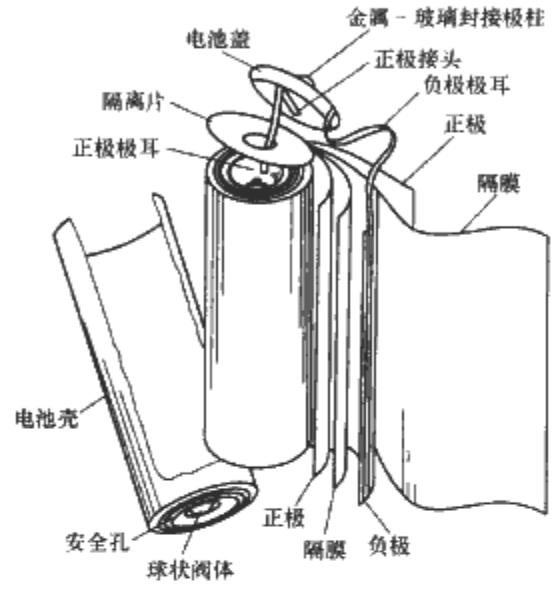


图 6.10-1 Li/MoS_2 蓄电池的典型结构

该电池体系在不同放电负荷和温度下的放电性能示于图 6.10-2 中，为了得到电池的全部容量，放电需要在较宽的电压范围内进行，由此放电电压曲线呈现倾斜的态势，然而这种电压特征可以用作荷电状态的指示。

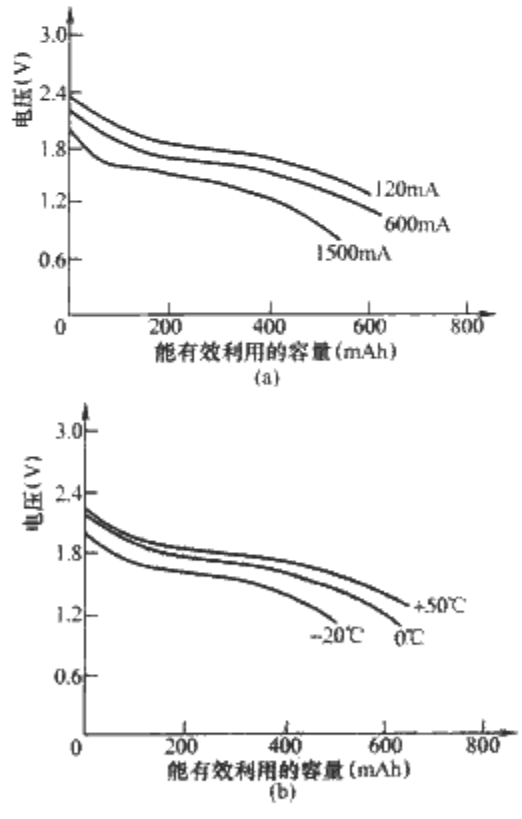


图 6.10-2 Li/MoS_2 电池的放电特性

（a）在 20℃下的放电特性；（b）在不同温度下以 120mA 放电时的特性（电池在 20℃下以 60mA 充电至 2.4V）

锂/二氧化锰（$Li/Li_{0.3}MnO_2$）电池 采用 Li/MnO_2 化学体系的圆柱卷绕式 AA 电池也已经研制成功，其结构与 Li/MoS_2 电池完全相同。商品电池中使用一种经过特别热

处理的 Li_xMnO_2 与碳黑混合制作正极，1mol/L 的 $LiAsF_6$/二氧戊环为电解液，其中添加三丁基胺作为稳定剂。

图 6.10-3 表示出 AA 型锂/二氧化锰电池的典型充放电特性和循环性能。由图 6.10-3(a)可以看出，以中等放电倍率放电时，其放电曲线是十分平坦的，其中点电压略低于 3V。电池可以在电流高达约 2A 下放电至 2.0V 终止电压。电池的自放电率很低，在多数金属锂/有机电解质蓄电池中这是一个典型情况。电池的循环特性如图 6.10-3(b)所示，当以 100%放电深度在 $C/3$ 放电和 $C/12.5$ 充电条件下循环时，电池可获得 200 次循环寿命。在 100%DOD 条件下，以 250mA 放电和 80mA 充电至 3.4V 条件下，至初始容量 65%时，电池循环寿命可达到 300～350 次。

这些使用金属锂的 AA 型电池由于显示良好的安全性，使其曾经进入消费市场，特别是在军事通信装备上的应用。该电池遇到某种滥用情况时，其内部的电解质可以发生聚合反应，使电池达到内部关闭状态，从而保护电池在滥用条件下可能出现的短路与过充电（在 4.0V 关闭）。

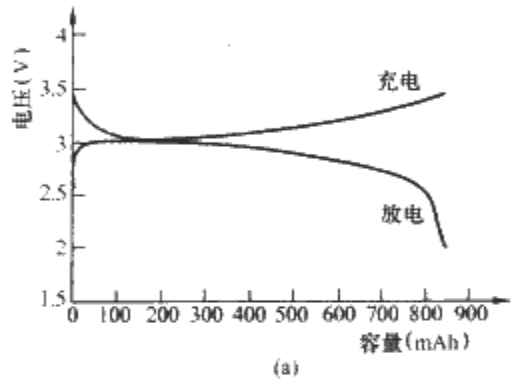


图 6-10.3　AA 型 $Li/Li_{0.3}MnO_2$ 电池的充放电性能
（a）充放电曲线，I_c=250mA、I_d=250mA（第 5 次循环）；
（b）容量与循环数的关系，I_c=60mA、
I_d=250mA（100%DOD）

1.2.2　硬币式锂蓄电池

一系列硬币式可充电电池已经正式得到在小型用电装置上的应用，其中包括用作小型电子装置和存贮器备用电源或作为太阳电池或其他辅助电源的贮能电源。这些电池通常具有较高的电压 3V 和显著高的比能量，从而比采用镉镍电池或其他传统电池的重量更轻、体积更小。电池的自放电率通常低于每年 5%，也显著低于镉镍电池的每月 30%左右。这一特性使该类电池在长时间贮存后无需再充电，仍可使用。这类电池大多不适宜于在深度放电条件下使用，否则充放电循环寿命很短；建议在浅放电条件下使用，则可显示出长循环寿命和良好的贮存特性。

在这些硬币式锂蓄电池中，一般采用金属氧化物嵌入化合物作正极活性物质；采用诸如锂铝合金等作负极，其化学反应性比金属锂要低；同时采用有机电解质溶液作电解质。具体上市的电池品种有以下几种：

(1) 锂铝/二氧化锰电池。图 6.10-4 绘出了一种典型的 $LiAl/MnO_2$ 硬币式电池结构，这种电池结构设计与标准原电池的硬币式结构设计几乎没有差别。

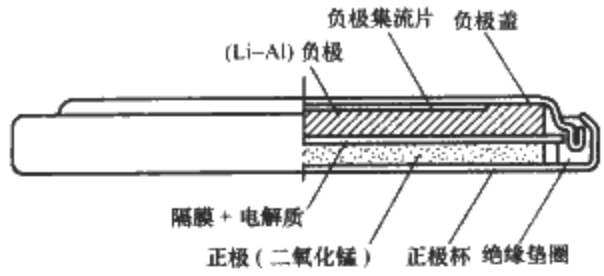


图 6.10-4　$LiAl/MnO_2$ 硬币电池的剖面图

$LiAl/MnO_2$ 硬币电池采用锂铝合金作负极，其中加入了适当添加剂可以防止负极的开裂和起泡，从而改善循环性能。正极由 MnO_2 和 LiOH 的混合物组成，并通过热处理得到高孔隙率复合氧化锰（$MnO_2+Li_2MnO_3$）正极活性物质，其反应式可表示如下

$$yMnO_2+zLiOH \longrightarrow (y-z)\ MnO_2+\left(\frac{z}{2}\right)Li_2MnO_3+\left(\frac{z}{2}\right)H_2O$$

复合物的特性是在充电循环时允许锂离子容易地脱离正极材料，电解质使用三种成分的混合溶剂，包括碳酸乙烯酯、碳酸丁烯酯和二甲氧基乙烷（DME）。隔膜为聚丙烯。

硬币式 $LiAl/MnO_2$ 电池在几种放电负载与温度下的放电性能表示于图 6.10-5 中，若干不同产品的型号、尺寸和主要性能列在表 6.10-1 和表 6.10-2 中。由于采用锂合金损失了 0.3V 电压，这类电池的工作电压接近 2.5V。

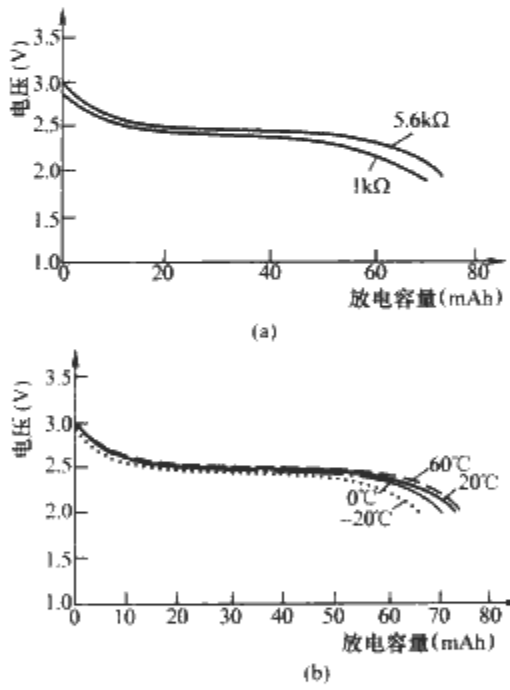


图 6.10-5　硬币型 $LiAl/MnO_2$ 电池放电特性曲线
（a）在 20℃下以不同负载进行放电；
（b）在不同温度下，以 5.6kΩ 负载放电

表 6.10-1　两种硬币式锂铝/二氧化锰电池的主要性能

型　号	ML 2430	ML 2016
标称电压（V）	3	3
标称容量（mAh）	70	20
直径（mm）	24.4	20
高度（mm）	3.1	1.6
质量（g）	4	1.7
工作温度（℃）	−20～60	−20～60
自放电（%）	20℃下，>5%/年	20℃下，>5%/年

续表

型 号	ML 2430	ML 2016
循环寿命	3mAh 下，2000 次 12mAh 下，500 次 24mAh 下，200 次	1mAh 下，2000 次 4mAh 下，500 次 6mAh 下，200 次

表 6.10-2 硬币式锂铝/二氧化锰电池产品的型号、尺寸和主要性能

型 号	标称电压 (V)	标称容量 (mAh)	尺寸 (mm)		基本电池质量 (g)	推荐电流 (mA)
			外径	高度		
ML612S	3	2.3	6.8	1.2	0.15	0.01
M1616	3	2.0	6.8	1.6	0.20	0.01
Ml616S	3	2.9	6.8	1.6	0.19	0.01
ML621	3	3.0	6.8	2.1	0.25	0.01
ML621S	3	4.5	6.8	2.1	0.25	0.01
Ml.2020	3	45.0	20.0	2.0	2.2	0.1

$LiAl/MnO_2$ 硬币电池的基本充电要求有一个电压限制为 3.25V 的电流源，图 6.10-6(a)中表示出恒电压方法充电的特征，其中当电池电压达到充电器设置的极限电压值时，电流开始下降。一般可以在充电器的电路中接上一个保护电阻，以限制和控制初始与长期浮充电期的充电电流。图 6.10-6(b)图表示出循环寿命与放电深度的依赖关系，显然在浅放电深度下才能获得长的循环寿命。

(2) 锂铝/钒氧化物电池。$LiAl/V_2O_5$ 电池是另一个具有低自放电率（20℃下每年 2%）的可充电硬币电池，它同样可应用于低放电率场合。当放电深度为 10%时，可循环 1000 次以上。除了正极活性物质更换为 V_2O_5 外，其电池结构与图 6.10-4 显示的结构相类似。

表 6.10-3 列出了这类电池产品的技术指标。在不同放电电流与温度下的放电特征说明该电池的放电曲线上呈现两个放电平台。

这类电池主要用作存贮器的备用电源，包括如传真机、存贮卡、个人计算机、电话、车床和摄像机等。

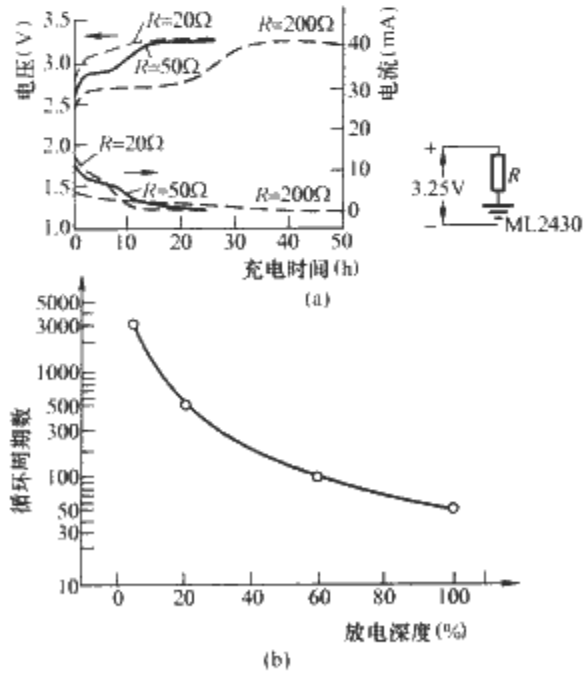


图 6.10-6 20℃下硬币锂铝/二氧化锰电池的特性
(a) 充电特性；(b) 循环寿命与放电深度的依赖关系（ML2430 电池）

表 6.10-3 硬币型可充电锂铝/五氧化二钒电池

型 号	标称电压 (V)	标称容量 (mAh)	尺寸 (mm)		基本电池质量 (g)	推荐电流 (mA)
			外径	高度		
VL621	3.0	1.5	6.8	2.1	0.3	0.01
VL1216	3.0	5.0	12.5	1.6	0.7	0.03
VL1220	3.0	7	12.5	2.0	0.8	0.03
VL2020	3.0	20	20.0	2.0	2.2	0.07
VL2320	3.0	30	23.0	2.0	2.8	0.10
VL2330	3.0	50	23.0	3.0	3.7	0.10
VL2032	3.0	100	30.0	3.2	6.3	0.20

注 充电/放电循环，10%放电深度下，大约 1000 次；充电，恒电压充电；工作温度，−20℃(−4℉) ~60℃(140℉)。

(3) 碳—锂可充电电池。碳—锂电池采用锂合金作负极，碳酸丙烯酯的非水有机溶液为电解质和活性炭为正极。该电池制备成放电态，充放电的工作模式如下

$$\text{负极}\quad Sb_xBi_y + Li^+ + e \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} LiSn_xBi_y$$

$$\text{正极}\quad nC + LiClO_4 \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} C_nClO_4 + Li^+ + e$$

单体电池构成：Sn-Bi 合金/$LiClO_4$ · PC/C(活性炭粉)。

电池结构也是类似于图 6.10-4 的结构，只是用活性炭替代了原先的活性物质。碳—锂体系只有较低的体积比能量，但是显示了长的循环寿命和低的自放电率，它甚至可以采用低到几微安的电流进行充电。它的重要应用是小型电子装置，譬如要求低功率、长寿命电源的遥控装置。碳—锂电池可与太阳电池组合在一起应用，太阳电池为该电池充电，以保持其处于荷电状态。在不同光强度下，碳—锂电池的充电性能表示于图 6.10-7 中。

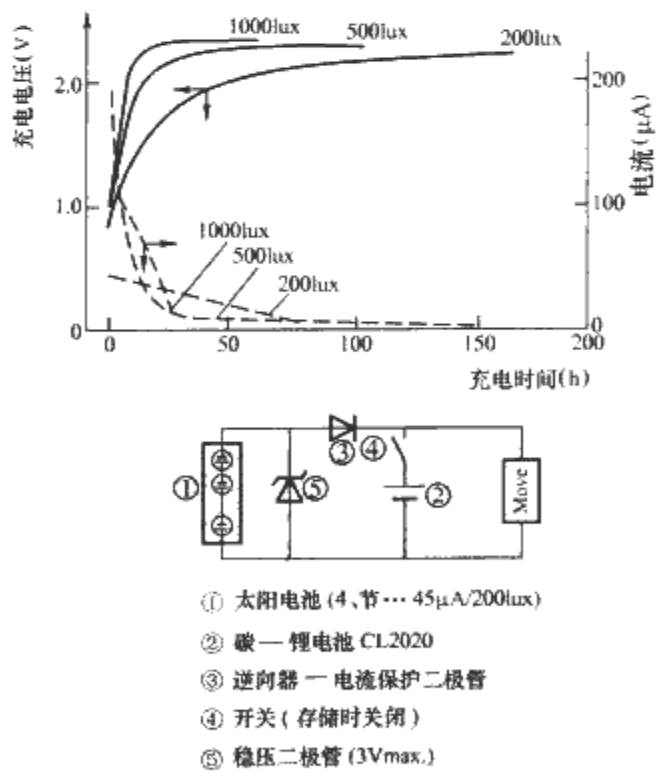


图 6.10-7 硬币式碳—锂电池（CL2020）采用太阳电池充电时的充电性能

碳—锂电池的循环寿命，同样也与放电深度紧密相关。当放电深度非常低时，例如对 CL2020 电池只放电至 0.1mAh 时，其循环寿命可达 10 000 次以上。表 6.10-4 列出了电池产品的型号与相应的技术指标，目前这类产品已进入消费市场。

表 6.10-4　　硬币式碳—锂电池

型　号	CL1220	CL2020	CL2320	CL2330
标称电压（V）	3	3	3	3
标称容量(至 2V，mAh)	0.3	1.0	1.5	2.5
直径（mm）	12.5	20	23	23
高度（mm）	2.0	2.0	2.0	3.0
质量（g）	2.8	1.9	2.8	3.7
工作温度（℃）	−20～+60			
循环寿命	10 000 次以上			
推荐电流（μA）	1～30	1～100	1～200	1～200
充电方法	电压控制			

1.3　正在发展和具有应用前景的锂蓄电池体系

1.3.1　聚合物电解质锂电池及其特性

图 6.10-8 说明了锂聚合物电池的内部设计，电池制备是先通过层压将 5 层薄膜压在一起，其中包含有绝缘薄膜层、锂箔负极、固体聚合物电解质、过渡金属氧化物正极（VO_x）和电流集流体，然后将层压后的膜卷绕成一个胶卷结构（如图 6.10-8 所示）或者一个扁平卷结构（如图 6.10-9 下部单体图所示，它偏向用于多电池组合情况）。然后适应不同应用要求，通过串联和并联将这些电池装配成不同尺寸和不同形状的电池组。图 6.10-9 说明了用于电动车辆锂—聚合物电池的设计，它是由单体层压扁平电池堆构成的电池组件。电池是可以在一个容器中实现串联、并联或串并联阵，以达到所需要的电池组件的的容量和电压。组装同时也提供了工作时要求的机械、电和热的控制，由此每一个电池组件都是一个完整的功能电池体系，它与电池组控制器有着包括智能控制和电子监视功能的联系界面。

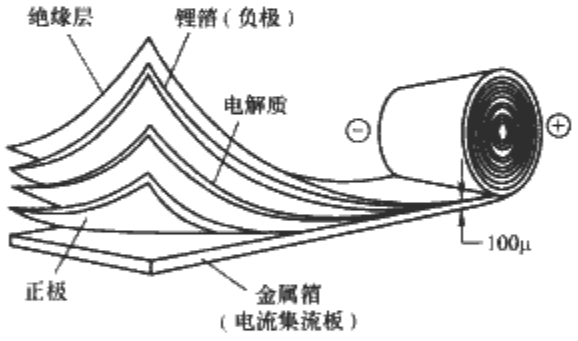


图 6.10-8　聚合物电解质锂蓄电池单体结构图

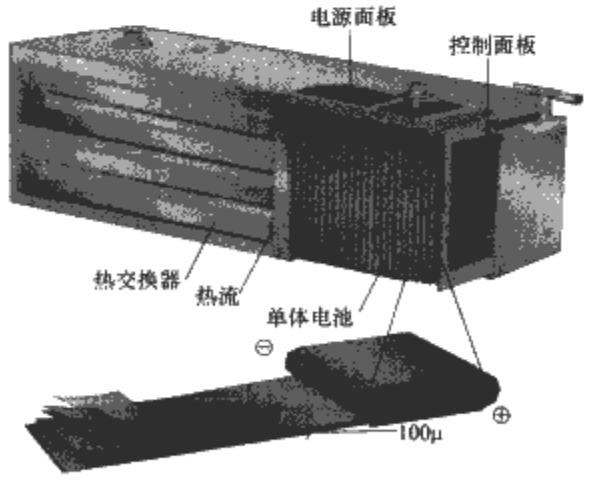


图 6.10-9　电动车用锂聚合物电池组件

图 6.10-10 表示出 Li/VO_z 电池组件（又称模块）的一条典型放电曲线，电池在 60℃环境温度与 10A 下能够输出 80Ah 容量。显然这种电池在高的环境温度下显示出优良的性能是其一个主要优点，单体电池可以在 40～60℃温度环境工作，并且不含任何液体；电池设计实现在无通风和温暖条件下（例如通信中心）性能无衰变；它不含液体，由此是全密封的；同时处于干态下工作，不会有漏液问题。这样电池是无需维护的。此外，电池表现出优良的安全特性，过充电试验不产生气体；即使电池组件遇到破裂事故，也不可能出现漏液；还有一个突出点，即一个完全破裂的电池进行浸水试验也只显示很低的反应程度。

目前采用聚合物电解质与金属锂负极相匹配，既可保持锂电池高比能量的特点，又可避免锂在液体电解质中的安全问题，同时还可能延长循环寿命。由此，各国都把聚合物锂蓄电池作为锂离子电池之后的一个新目标加紧研究，试图将蓄电池的比能量从目前的 120～150Wh/kg 提高到 200Wh/kg，以满足电动车辆的动力要求。

1.3.2　硫基正极材料的锂蓄电池及其特性

锂/硫（Li/S）电池是以硫与有机硫基聚合物材料作正极，金属锂作负极的二次锂电池。以单质硫为活性物质计算的理论比容量可高达 1675mAh/g 和与锂配对电池的理论比能量高达 2600Wh/kg，而且材料资源丰富和价格低廉。因此一直受到各国学者的重视，并进行了大量的研究与开发工作。

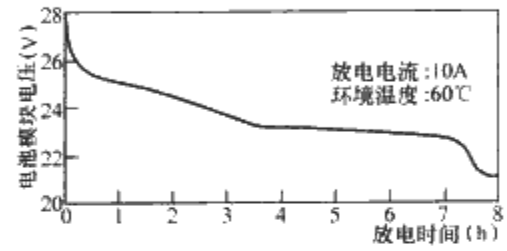


图 6.10-10　一个 Li/VO_z 聚合物电解质电池模块的典型放电曲线

虽然锂/硫基正极体系显示了高比能量特征，但要使该体系达到高的实际比能量，就必须解决硫电极的导电性差影响电池的利用率和放电率的问题；同时还要解决硫在电解质中溶解导致的电池贮存和循环寿命短的问题。

自 2001 年起我国也开始致力于硫与有机硫基聚合物材料锂/硫（Li/S）电池的研究，目标是发展比能量达到 300Wh/kg 的蓄电池新体系。其中在单质硫应用方面，进行了高性能复合硫电极制备和电解液组分选择研究，由此提出了复合硫电极的概念，它包含通过选择合适的导电添加剂和其他添加剂以及通过合适的方法将硫均匀混合到多孔碳中或用碳均匀包覆起来，由此大幅度提高硫电极中硫的活性和电极的导电性，同时也可提高硫本身的稳定性；另一个是选择合适的电解质组分，以适应电极的循环反应能力，特别是降低硫的溶解度。

近来采用在硫电极中引入催化剂如 MnO_2，NiS，FeS_2，CuS，CoS_2、将纳米硫分散到多孔炭材料中去和选择既具有好的电子导电性又对硫的放电产物具有较强吸附能力的一种或多种碳材料、选择炭纤维调整复合硫电极孔率等措施，达到了复合电极预期的效果，如图 6.10-11 所示。计算表明，软包装电池

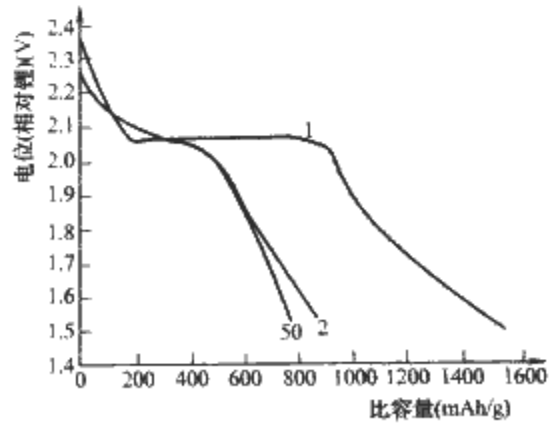


图 6.10-11　Li/S(复合电极)电池的首次、第 2 次和第 50 次放电曲线(I=0.05mA)

样品已经演示出达到 301Wh/kg 的比能量。同时还进一步发现将纳米硫分散到多孔炭中，同时添加一定尺寸的炭纳米管调节硫电极孔率，使复合硫电极的性能又有新的提高。

进一步则提出采用导电聚合物固定硫的设想，既达到减小其在电解质溶液中的溶解度目的，又试图通过导电聚合物骨架来提高材料的导电性。提出的几种典型有机聚硫化合物骨架来提高材料的导电性。提出的几种典型有机聚硫化合物分子结构及其理论比容量值见图 6.10-12。

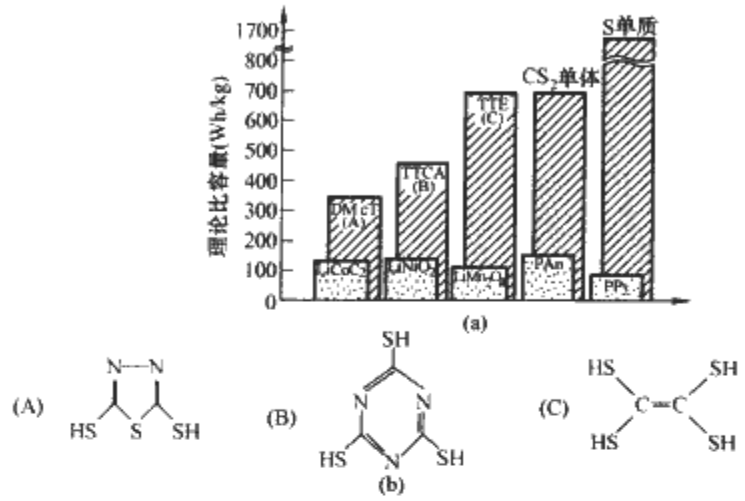


图 6.10-12 典型有机聚硫化合物分子结构及其理论比容量值

(a) 理论比容量；(b) 三种有机聚硫化合物的分子结构

曾采用这类材料制备了液体电解质 AA 尺寸电池，其工作电压为 2.1V，输出容量 1Ah，质量比能量和体积比能量可分别达到 215Wh/kg 和 260Wh/L。分析表明该体系具有内在的过充电和过放电保护机制，即可溶的硫粒子在这些条件下能在电极间发生“关闭”反应，参见图 6.10-13。AA 型电池演示出具有驱动 GSM 手机的能力，如图 6.10-14 所示。

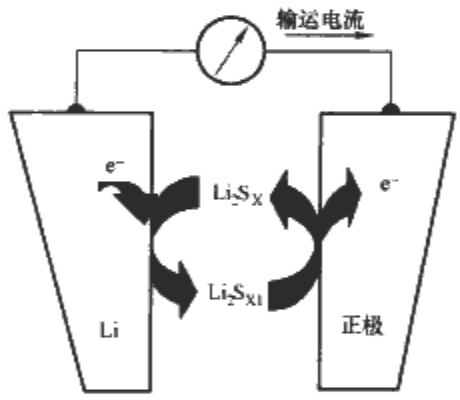


图 6.10-13 硫基材料提供的氧化还原输运保护机理

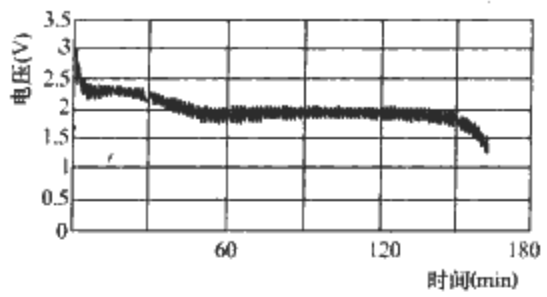


图 6.10-14 AA 型锂硫电池放电曲线（测试中包括 1.5A 脉冲 0.6ms 及随后 0.1A 脉冲 4.4ms）

锂/硫(Li/S)电池在 $C/3$ 充放电循环条件下能得到大约 200 次寿命。现在圆柱电池设计已由薄膜叠层结构所取代，其电极厚度由 66μm 减低至 47μm，用于富液型卷式电极设计。一个 1Ah 单元预计具有 1000cm^2 的电极面积，使其工作在较低的电流密度下。方形设计（34 × 48 × 3.5mm）在电压 2.1V 下，能够输出容量 950mAh，达到 310Wh/kg 和 350Wh/L。但电池自放电很高，每月可达 10%～15%，这与硫的溶解是相关联的。上述设计概念还提供了高功率放电能力，使该体系能够以 $8C$ 倍率进行放电，在 100Wh/kg 下可以实现 800W/kg 比功率，由此在混合动力车中具有潜在应用性。目前有好几个国家尚在继续发展这种技术。

近来我国利用分子设计原理构造了系列新型有机聚硫化合物。将 S—S 键的位置锁定在分子内，这样 S—S 键较易在原有位置重新结合，同时由于这类新型材料在电化学氧化还原过程中 S—S 键的断裂、复合与导电高分子主链结构和状态无关，材料的循环性能得到提高。另外在导电高分子的催化作用下，S—S 键的氧化还原将会更容易进行，因此材料在大电流充放电时的表现也有望得到改善。其中一个例子是硫蒽材料，其分子结构和相应的电化学反应如图 6.10-15 所示。

聚六硫蒽在不同电解液中进行恒电流充放电时（电流密度 40mA/g，电压 1.4～4.4V），其前三周放电比容量可以超过 1000mAh/g，循环 32 周容量还保有 470mAh/g，充放电效率基本保持在 90%以上。这一结果优于目前所报道的各种有机聚硫化合物，展现了一定的发展与应用前景。

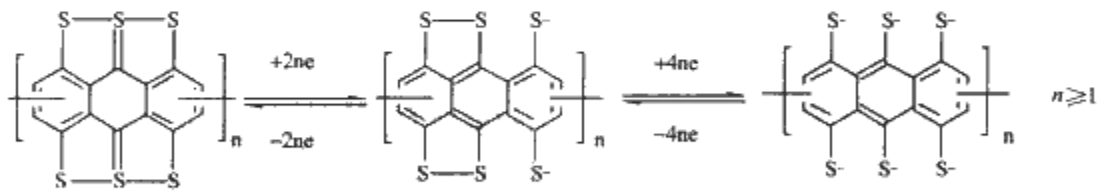


图 6.10-15 六硫蒽的电化学反应过程

2 锂离子电池

锂离子电池相对于其他类型电池的主要优点与缺点汇总于表 6.10-5 中。商品电池具有高质量比能量(～159Wh/kg)和体积比能量(～400Wh/L)，使其特别适合对质量与体积要求苛刻的应用场合。锂离子电池的自放电率低[(2%～8%)/月]、循环寿命长(大于 1000 次)和工作温度范围宽广(充电在－20℃～60℃，放电在－40℃～65℃)，这使其可以满足各种类型的应用。锂离子单体电池一般工作在 2.5～4.2V 范围，近似于是镉镍或金属氢化物镍电池的三倍，由此在满足规定电压值时，只需要较少的电池数量。锂离子电

表 6.10-5 锂离子电池的主要优点与缺点

优 点	缺 点
1. 密封电池，无须维护	
2. 长循环寿命	
3. 宽广的工作温度范围	1. 中等程度的初始价格
4. 长贮存寿命	2. 高温下有衰减
5. 低自放电率	3. 需要保护电路
6. 快充电能力	4. 过充电时，会出现容量损失或可能热失控
7. 高放电率和高功率放电能力	
8. 高容量和能量效率	5. 电池撞击破裂时，会排气和可能热失控
9. 高质量比能量和高体积比能量	
10. 无记忆效应	

池同样可以设计成高放电率型或高输出功率型，此时不仅可以 5C 乃至 25C 进行脉冲放电，甚至可以在 10～20C 下连续放电，并输出很高的比能量。随着价格下降和趋于合理，电池和电池组系密封包装，其应用范围越来越宽广。

如表 6.10-5 可以看出，锂离子电池是一个高比能量电池体系，其主要缺点乃是与稳定性和安全性相关联，这包括当放电至 2V 以下时，电池性能会衰减；当过充电时，由于不存在水溶液电池化学体系那样的过充电控制反应机理，因此会发生电池排气。由此一般要求采用管理电路和机械短路器件来防止锂离子电池的过放电、过充电或内部温度升得过高。

锂离子电池从研究开发转向到销售，在过去 10 年中其市场迅猛成长壮大，1999 年销售量已达到 4 亿只电池。而 2005 年则上升至接近 17 亿只，销售额高达 40 多亿美元。其年增长态势可参见图 6.10-16 的数据，可以看出锂离子从无到有已经形成了一个巨大的新型产业。

作为新型绿色电池的一种，锂离子电池技术已经迅速转化成广阔市场范围内的标准电源产品，然而在电池向多样化应用场合扩展时，电池性能也需要继续得到改善与提高。为了满足市场的需求，已经设计出各种结构和各种尺寸的产品，包括圆柱形卷绕式电池、方形卷绕式电池、方形平扳式结构电池等，而且覆盖了由小尺寸（0.1Ah）到大尺寸（100Ah 以上）的宽广范围。目前锂离子电池的应用覆盖了消费电子装置，如手机、笔记本计算机、个人数据支持机、便携式 DVD、数码相机和摄像机等，近来又进入电动工具和电动自行车的应用以及军事电子装置，包括接收机、地雷探测器、夜视与全球定位装置以及卫星等。今后应用具有前途的还包括飞机、鱼雷、潜艇、航天飞机和电动车辆或混合动力车辆等。

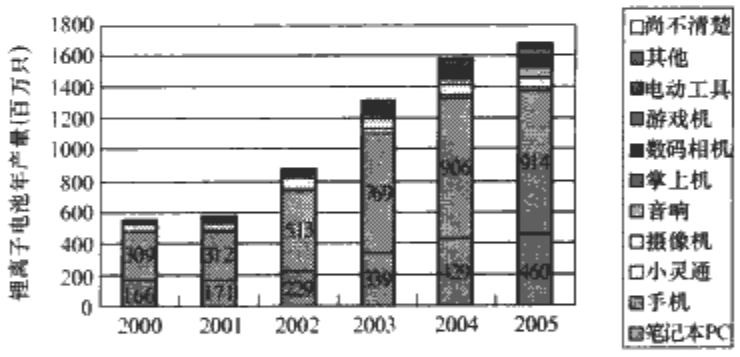


图 6.10-16　2000 年以来的世界锂离子电池的年增长量

自 1999 年至 2005 年，在锂离子电池技术、产品性能、品种与生产数量以及应用范围一直处于不停顿地快速发展中，而单体电池平均价格也一直处于降低趋势，由此极大地推动着它未来的继续快速增长和满足更加广泛的应用要求，最近权威机构根据其完整的技术与市场调查，提出了今后 5～7年内对锂离子电池的需求增长趋势，如图 6.10-17 所示。从图上数据可以看出，今后 7 年内锂离子电池的需求量将从现在的 18 亿只左右增至 28 亿只左右。而且锂离子电池将会从 2008 年起全面进入电动工具的应用，而自 2010 年起，逐步进入混合动力车的应用等。

2.1　工作原理与电池反应

锂离子电池的工作原理可以用图 6.10-18 加以说明。由图看出锂离子二次电池在充电时，Li^+ 从正极化合物（以氧化钴锂为代表）中脱嵌，通过在电解质中的迁移并嵌入到负极晶格（以石墨为代表）中；放电时，Li^+ 又从负极脱嵌出来，通过在电解质中的迁移最后再插入到正极中，使正极又成为富锂态。为保持电荷的平衡，充、放电过程中应有相同数量的电子经外电路传递，与 Li^+ 一起在正负极间迁移、使正负极发生氧化还原反应，保持一定的电位。电极电位与构成电极的插入化合物的化学性质、Li^+ 的浓度等有关。这种充、放电过程很像一把摇椅（Rocking Chair），故锂离子二次电池又被称为摇椅电池（Rocking Chair Battery）。

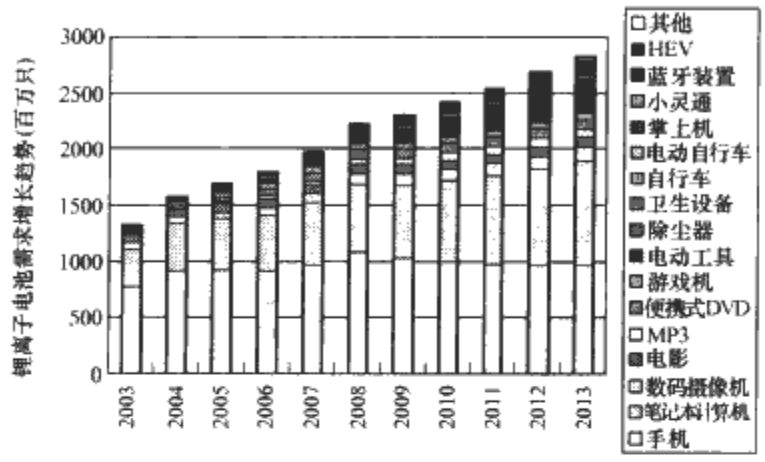


图 6.10-17　锂离子电池未来的市场需求量增长趋势预计

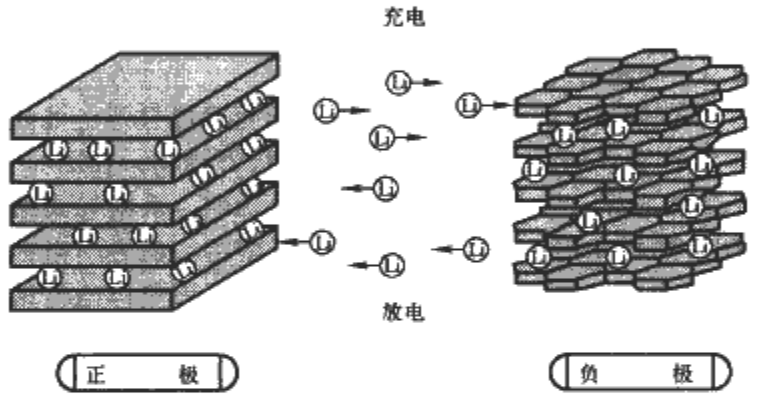


图 6.10-18　锂离子蓄电池的充、放电工作原理图

该电池中的化学反应可以分别表示如下

正极反应

$$LiMO_2 \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Li_{1-x}MO_2 + XLi + Xe$$

负极反应

$$C + XLi \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Li_xC$$

电池反应

$$LiMO_2 + C \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Li_xC + Li_{1-x}MO_2$$

按照上述反应式，锂离子从碳材料晶格中的脱嵌发生在接近金属锂的电极电位（较锂电极电位略正），且 $LiCoO_2$ 正极反应的电极电位约在 4.0V 左右（相对锂电极），因此这种新型蓄电池具有高的工作电压（平均工作电压 3.6～3.7V）。同时计算表明，$C/LiCoO_2$ 电对的理论比容量和理论比能量分别可达 170mAh/g 和 397Wh/kg。

应该指出锂离子电池能够得以问世，其中最重要的工作是在大量基础研究工作基础上，找到了适宜于锂离子可逆嵌入和脱嵌的碳负极材料以及实现上述反应的电解质组成。实际上在实现按照 6.10-18 图上的锂离子电池反应过程前，电池内首先发生了溶剂在碳负极上的还原反应，如图 6.10-19 示意图所示。该反应虽然会降低负极的充放电效率，但它却

在碳负极表面形成了具有电子绝缘、而对离子导电的固体电解质交界面“SEI”。如图 6.10-19 所示这层 SEI 膜的主要组成为 R（烃基团）和 X（酸根）与锂的化合物，一般如 $LiCO_3$ 和 $ROCO_2Li$ 等。一旦这层膜形成并达到一定厚度后，溶剂在电极上的还原反应就受到抑止而停止，接着锂离子在碳中的嵌入反应（负极充电）和脱嵌反应（负极放电）才可顺利进行下去。

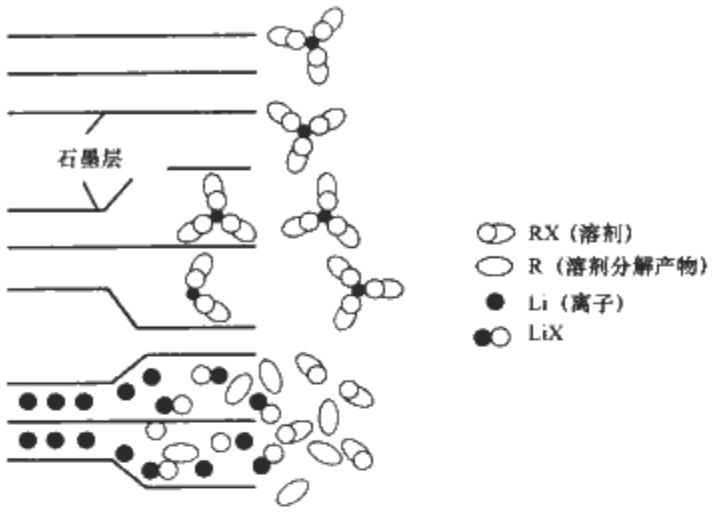


图 6.10-19 碳表面形成 SEI 膜的过程示意图

2.2 电池结构、关键材料和电池制造工艺流程

2.2.1 电池结构

小型锂离电池产品（<4Ah）以方形和圆柱形电池设计为主，而且它们大多都采用卷绕式电极群结构，如图 6.10-20(a)和(b)所示。然而在大型电池设计中，采用卷式结构的园柱形电池依然常用，同时具有平板构型的方形电池也较为普遍。对方形锂离子电池组而言，两种单体电池结构形式都是适用的，包括卷绕式方形结构和平板电极方形结构。由于锂离子电池是在放电态制造出来的，因此使用前必须充电。

若将上述结构图与金属氢化物镍电池的结构作一比较，可以发现它们在许多方面完全是相同的，但是园柱形锂离子电池的盖子上一般串联了一个 PTC 正温度系数元件，当电池出现过高的电流或过高的温度时，可通过电阻升高降低或近于中止电路中的电流；此外还特别设计了一个机械拉断机构，如图 6.10-21 所示。

机械拉断机构中的薄弱环节在压力作用下破裂，使电池断路。该机构是当电池处于滥用条件下（如过充电）而内压达到一定值时，拉断机构可以自动切断正极接耳与正极帽间的连接，即断开了充电电流，防止电池因压力继续升高而爆破。还要说明一点与金属氢化物镍电池结构的不同之处，即锂离子电池是完全密封的结构，其排气阀一旦打开，电池基本上就失效了。而金属氢化物镍电池内压高至一定程度，即可及时排气，待内压降低后密封又自动恢复，电池仍可继续使用。

2.2.2 电池中的关键材料

电池中的关键材料包含负极材料、正极材料、电解质材料和隔膜材料，以下简要予以说明。

1. 负极材料

锂离子电池产品首先是采用了可逆嵌入和脱嵌锂的碳材料为负极活性物质。用碳取代金属锂作负极，可以避免充放电过程树枝状锂的形成，从而不仅能提高电池的循环寿命，而且可以极大地改善电池的安全性等。

碳材料的种类繁多，性质各异。碳材料可按照其晶体结构的不同做出基本分类，包括易石墨化碳，难石墨化碳，金刚石和 C_{60}。其中石墨化碳又称为软碳，包括非晶碳、焦炭（如石油胶、煤焦炭等）和石墨（人造石墨和天然石墨）。显然非晶碳和焦炭材料一般是可以通过高温处理（2000～3000℃），将结构中的乱层位错移去，使材料中的应力得到释放，形成石墨结构；难石墨化碳又称为硬碳，它是由酚醛树酯等前驱体制备得到的，它们即使在 3000℃下也不可能直接石墨化。易石墨化碳和难石墨化碳都显示了嵌锂的特

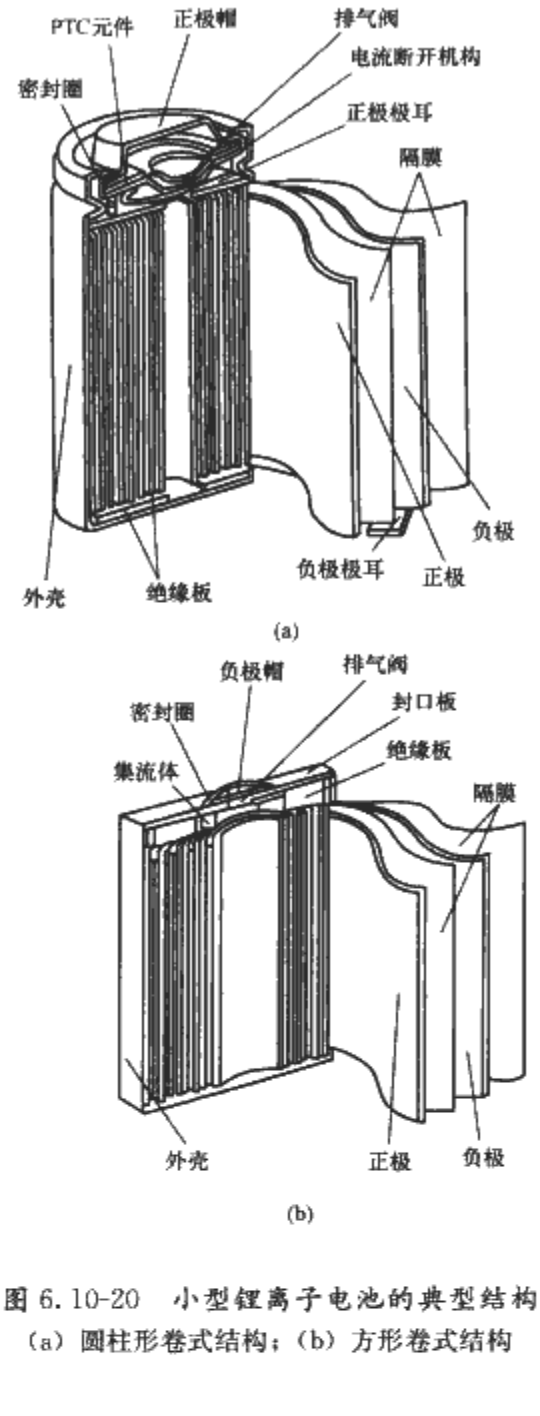


图 6.10-20 小型锂离子电池的典型结构
（a）圆柱形卷式结构；（b）方形卷式结构

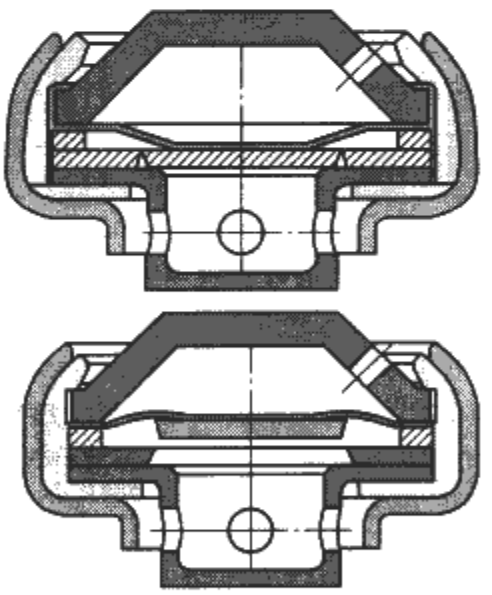


图 6.10-21 圆柱型锂离子电池盖子中设计的机械拉断机构

征，因此作为锂离子电池负极材料广泛得到了研究。其中除天然石墨外，其他碳材料都可通过适当前驱体材料类型的选择，就可以容易地得到。而且研究表明，前驱体材料和其加工参数决定了所制备碳材料的性质。

碳材料的基本构架是由碳原子排列在一个六面体中的一个平面层，而不同炭材料就可以看作是一个基本结构单元（BSU）的不同聚集体，它由直径为 2nm 的两或三种平行平面组成。BSU 可以是自由取向的，就形成了炭黑（一种典型的非晶碳）；定向于一个平面、晶轴或点，就形成了一种平面石墨、一种晶须或一种小球体。天然石墨就是一种典型的平面石墨，外观呈鳞片状，其层间距 0.335 4nm，理论密度为 2.226g/cm^3。

能够作为锂离子电池负极碳材料，一般应具有高的锂可逆嵌入与脱嵌量（即相应高的可逆比容量）、低的不可逆容量损失和平稳的放电电压，同时还要具有高的密度、适当的颗粒形状与尺度、较低的表面积等。其中 1990 年索尼公司推出的世界第一个锂离子电池采用了石油焦碳材料。接着三洋公司在商品化电池中采用了天然石墨，而松下公司则采用了石墨化中间相碳微珠（MCMB）。

石油焦碳是由石油前驱体在 1000℃左右温度下热解得到的。它的特点是与许多类型的电解质溶剂有相容性，包括碳酸丙烯酯（PC），而且锂离子在其体相中的扩散速度与安全性优于石墨。但是其比容量低于石墨材料，一般为 200～250mAh/g；而且放电电压曲线是倾斜的，远不如石墨平坦。

石墨型碳材料的特点是放电电位最接近锂的电位，而且放电曲线显示十分平坦。其中，石墨化 MCMB 碳材料是一种典型的人造石墨，它具有比石油焦碳更高的比容量（～320mAh/g）和更低的首次循环不可逆容量（～20mAh/g）；低成本天然石墨具有最高的比容量（～360mAh/g），接近锂在碳中嵌入反应的理论比容量（按嵌入化合物 C_6Li 计算，其理论比容量为 372mAh/g）。但是其不可逆容量（～50mAh/g）比 MCMB 高，同时显示出较高的容量衰减率。

石墨化 MCMB 碳材料的主要性质如表 6.10-6 中所列。由表可以看出，粉体材料的颗粒呈球形，粒径大小和分布范围可控，具有高的密度和低的表面积，特别适合在铜箔上进行电极连续涂敷。采用这种材料可以制备出非常均匀的涂敷表面。同时在对涂敷电极进行干燥和下一步滚压后，不仅可进一步提高厚度均匀性，还可使涂敷层更加致密和平整。

表 6.10-6　　石墨化 MCMB 碳材料的主要性质参数

颗粒形状	球　　形
颗粒度（D50，μm）	10～20（根据需要可调）
真密度（g/cm^3）	2.0～2.2
振实密度（g/cm^3）	1.25
含量（%）	＞99
比容量（mAh/g）	＞320 （第一次循环不可逆容量损失：20～50）
比表面（m^2/g）	2.0

天然石墨作为一种矿物存在于自然界，显示成本低廉的优势，一直是电池制造商希望选用的负极材料。但是开采出来的天然石墨含有较多的杂质，同时密度较低，表面积过大，很难直接使用来制备涂敷电极。由此一般都需采用适当的处理方法加以改性。这包括化学处理去除石墨中的杂质、特殊机械球磨使颗粒转化为类球形、采用包覆技术修饰表面状态等。

当今各大公司生产的小型电池，基本上都使用石墨型碳负极材料，其比容量已达 340～360mAh/g。其中主要有 MCMB、合成石墨纤维和天然石墨等碳材料等，如表 6.10-7 所示。

表 6.10-7　　用于锂离子电池中的不同碳负极材料的主要性质比较

类　型	比容量（mAh/g）	不可逆容量（mAh/g）	颗粒度（D50/μm）	BET 表面积（m^2/g）
人造石墨	345	45	44	10
球形石墨(MCMB)	305	19	26	0.86
球形石墨(MCMB)	290	30	10	2.64
石墨化碳黑	200	152	.075	30
天然石墨				
石油焦炭	220	55	45	无
针状焦炭	234	104	45	6.7
碳纤维	363	35	23	11
硬碳	575	215	无	40

但鉴于石油焦炭和硬碳类材料显示出较高的锂离子在固相中的扩散速度和较优良的安全性，依然可以在设计混合动力车等用的高功率型电池中得到使用。这时常常强调比功率特性，而降低了对比能量的要求。

我国从自主开发到实现应用，已分别建成了上海杉杉和天津铁中 MCMB 碳负极材料规模生产线，材料的主要性质和质量已与进口产品水平接近，实现了我国部分锂离子电池负极碳材料的国产化。同时深圳等地也建成了天然石墨生产工厂，可以根据用户要求，提供不同参数或特性的产品供锂离子电池作负极材料使用。

2. 正极材料

适合作锂离子电池正极材料应符合下列要求：

（1）相对锂有高的电位。

（2）可逆脱嵌与嵌入锂的量较大（即相应高的电化学比容量）。

（3）可逆脱嵌与嵌入锂时无结构变化，而且其热稳定性较高。

（4）有尽可能高的电子导电性和离子在固相的扩散速度。

（5）在电解质中不溶解。

（6）原料和制备成本较低等。

除此之外，当选用作为正极材料时，还有考虑对材料密度、颗粒度及其分布、杂质含量、比表面积等的具体参数要求。

按照上述要求，锂离子电池的正极材料首选了具有高电位（3～4V）、可逆嵌入和脱嵌锂的层状结构的氧化钴锂（$LiCoO_2$）与氧化镍锂（$LiNiO_2$）以及尖晶石结构的氧化锰锂（$LiMn_2O_4$），表 6.10-8 中列出了上述三种正极材料的主要性质；在上述体系的基础上进一步又发展出一系列的衍生材料，如用钴部分取代 $LiNiO_2$ 中镍的氧化镍钴锂（典型化合物如 $LiCo_{0.2}Ni_{0.8}Al_{0.02}O_2$）和用钴与锰取代 $LiNiO_2$ 中部分镍的氧化镍钴锰锂（典型化合物如 $LiMn_{1/3}Co_{1/3}Ni_{1/3}O_2$）。特别值得关注的还有近来迅速发展起来的橄榄石结构

磷酸亚铁锂（$LiFePO_4$）材料。

在商品锂离子电池发展进程中，索尼公司推出的第一个锂离子电池产品是使用了 $LiCoO_2$ 正极材料。由表 6.10-8 可以看出，在最通常使用的正极材料中，$LiCoO_2$ 具有较高的质量比容量（140～155mAh/g）和较高工作电压，相对锂平均为 3.7V；$LiNiO_2$ 材料具有更高的比容量，达到 200～220mAh/g，但电压比 $LiCoO_2$ 或 $LiMn_2O_4$ 低了约 0.2V 以上。特别是这种材料热稳定性最差，安全性不易解决。显然尖晶石 $LiMn_2O_4$ 具有明显的价格和安全性优势，特别适用于那些应用对比能量要求不高，而对价格敏感或要求对滥用时显示优异稳定性的场合。但相对于已使用的 $LiCoO_2$，它的比容量较低（110～120mAh/g）；同时它有较高的容量损失，特别是在较高的温度下格外严重，还是限制了其应用范围。

表 6.10-8 用于锂离子电池的典型正极材料的性质比较

材料名称	理论比容量（mAh/g）	实际比容量（mAh/g）	放电电压（相对锂，V）	密 度（g/cm³）	特点比较
$LiCoO_2$	275	140～155	3.7～3.9	5.00	体积比容量高，放电曲线平坦，但价格较高
$LiNiO_2$	274	200～220	3.5～3.6	4.75	高比容量，极易放热分解，安全性差
$LiMn_2O_4$	148	110～120	3.8～4.0	4.28	比容量偏低，价格较低，安全性较高，但高温下贮存与循环性差

3. 电解质材料

用于锂离子电池的电解质有四类，即液体电解质、胶体聚合物电解质、聚合物电解质（固态）和陶瓷电解质（固态）。目前在锂离子电池产品中已得到大量使用的主要是液体电解质，其次是胶体聚合物电解质两类。

液体电解质是由锂盐溶于有机溶剂形成的溶液，其中典型的有机溶剂为碳酸酯类；纯聚合物电解质应是不含液体和无溶剂的材料，其离子导电相是由含锂离子的盐结合到聚合物中的官能团上形成的；而胶体聚合物电解质则是盐和有机溶剂同时溶于聚合物或与其混合形成的一种离子导电材料。用于锂离子电池的胶体电解质典型地为由 PVDF-HFP、$LiPF_6$ 或 $LiBF_4$ 盐和碳酸酯类溶剂形成的膜。胶体电解质的可能优越性在于当聚合物吸收液相组分后，电池发生漏液现象几率更低。然而液体电解质电池中，电解质也几乎完全地由电极和隔膜所吸收。胶体电解质通常称谓胶体聚合物电解质，而采用胶体电解质（或胶体聚合物）的电池则称谓胶体聚合物电池或简称聚合物电池。陶瓷电解质则是属于具有离子导电性的无机固体材料。

在锂离子电池电解质中常用的盐类如表 6.10-9 所示，其中当今大多数锂离子电池中都使用 $LiPF_6$ 作为电解质盐，其配制的溶液具有高的电导率（$>10^{-3}$S/cm）；高的离子迁移数（0.35）和可以接受的安全性质。碳酸酯类溶剂属质子惰性溶剂，呈极性并有高介电常数，由此可以与锂盐形成高浓度的溶液（>1mol/L）。同时它们也能与电池的电极材料在较宽广的电位范围内有相容性，并显示良好的安全性质。但是这种盐较贵、易吸水和与水反应时生成氢氟酸（HF），因此必须在干燥环境中进行保存和操作。有机盐类，如一类含硼的有机盐（简称 BOB）特别引起了重视。

表 6.10-9 用于锂离子电池电解质中的锂盐

常用名	分子式	摩尔质量（g/mol）	典型杂质	评 价
六氟磷酸锂	$LiPF_6$	151.9	$H_2O(15\times10^{-6})$ $HF(100\times10^{-6})$	最常用
四氟硼酸锂	$LiBF_4$	93.74	$H_2O(15\times10^{-6})$ $HF(75\times10^{-6})$	吸水性比 $LiPF_6$ 低
高氯酸锂	$LiClO_4$	106.39	$H_2O(15\times10^{-6})$ $HF(75\times10^{-6})$	加热干燥时，不如其他盐稳定
六氟砷酸锂	$LiAsF_6$	195.85	$H_2O(75\times10^{-6})$ $HF(15\times10^{-6})$	含有砷，已不采用
三氟甲烷磺酸锂	$LiSO_3CF_3$	156.01	$H_2O(100\times10^{-6})$	2.8V 以上铝腐蚀；对水稳定
五氟乙烷磺酸胺基锂	$LiN(SO_2C_2F_5)_2$	387	无	4.4V 以下对铝不腐蚀；对水稳定

当今在大多数锂离子电池都采用不同碳酸酯的混合溶剂构成的液体有机电解质，这是由于碳酸酯类具有优异的稳定性、良好的安全性质和与电极材料的良好相容性。纯的碳酸酯溶剂一般固有的电导率都低于 10^{-7}S/cm、介电常数大于 3 以及溶解锂盐可达到较高的浓度。其中，早期曾着重于使用碳酸丙烯酯（PC）类的溶液，但由于 PC 溶剂与锂盐溶质共嵌入时引起碳层间距严重膨胀甚至剥落，可使石墨电极性能衰减。因此在现在的配方中已选择了其他类型的碳酸酯，典型的有碳酸乙烯酯（EC）、碳酸二甲酯（DMC）、碳酸乙甲酯（EMC）和碳酸二乙酯（DEC）。锂离子电解质溶剂的选择也受到应用时有否低温要求的影响，低温电解质采用具有低凝固点的低黏度的溶剂或混合溶剂配制。

实际上在锂离子电池的电解质配方中，当今大多都使用 2～4 种溶剂的混合溶剂。与单一溶剂相比，混合溶剂构成的电解质显示更高的电导率和更宽广的工作温度范围，从而可使电池具有更优良的综合性能。例如碳酸乙烯酯（EC）与石墨负极一起工作时，使其显示低的不可逆容量和低的容量衰减率，因此在许多商品电解质配方中都发现有碳酸乙烯酯，但是它在室温下却是一种固体。多元溶剂配方中通常含有 EC，由此在保留了它的优良性质基础上，通过使用其他溶剂达到降低混合物凝固点和黏度的目的。

1mol$LiPF_6$ 溶液一般具有高的电导率，10^{-2} S/cm，其中少数几种溶剂，譬如 PC 和 EMC 具有良好的低温电导率和高的沸点。MA 和 MF 虽然电导率高，但如果任一种的用量超过质量比的 25%，电池性能很差。

4. 隔膜材料

锂离子电池对隔膜材料的要求主要有：

（1）良好的化学稳定性，在有机电解质溶液中以及对两个电极都显示良好的稳定性。

（2）对有机电解质溶液呈现良好的浸润性，即电解质能易于被微孔隔膜所吸收和保持。

（3）有较高的孔率，孔径尺度小（微米级）而均匀，由此不仅可吸收大量电解液，保持离子的传输，显示低的电阻；同时可以阻止微粒穿透引起短路。

（4）在电解质具有低的收缩率，防止隔膜过度收缩引起电池内部短路。

（5）厚度可在 15～35μm 间，且都显示足够的拉伸强度，满足自动卷绕时的高张力下不断裂要求。

（6）具有可靠的安全机制，即在一定温度下微孔能自动闭合，使电池的电流切断等。

聚烯烃类膜（如聚乙烯膜、聚乙烯/聚丙烯复合膜）已被选用作锂离子电池的隔膜材料，它们具备或较好满足上述各项要求。表 6.10-10 列出了微孔聚烯烃类膜隔膜的典型参数。

表 6.10-10　　锂离子电池用隔膜的典型参数

项 目 名 称	具 体 参 数
厚度（μm）	<25
平均孔径（μm）	<1
孔率（%）	>40
收缩率（%）	<5
拉伸强度（1000 PSI）	<2%
抗冲压强度（g/25μm）	>300
关闭温度(℃)	<150
熔点（℃）	>160
浸润性	满足锂离子电池电解质要求
化学稳定性	满足在锂离子电池电解质稳定性与耐氧化性的要求

2.2.3　电池制造工艺流程

图 6.10-22 是锂离子电池的典型制造工艺流程图。与其他传统电池的电极制造工艺不同，锂离子电池的电极采用了类似电子行业中的磁带涂覆或陶瓷元件流延工艺，由此可以制备出薄而均匀的连续电极，适合电池的自动化制造要求。同时制造工艺流程中的极群卷绕工艺即适合圆柱形电池，也适用于方形电池，并且都可实现机器的自动化操作。在采用叠片设计的方形电池或聚合物电池中，可以采用手工或机器叠片取代上述工艺中的极群卷绕工艺。

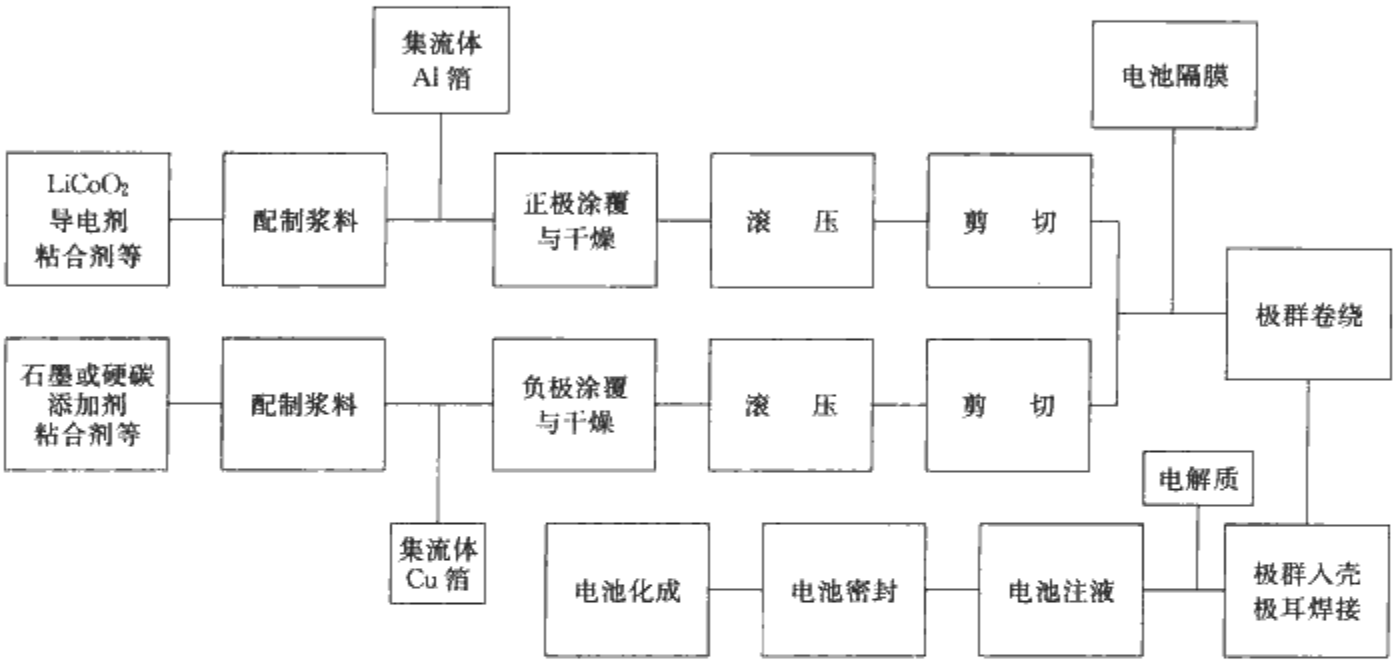


图 6.10-22　锂离子电池的典型制造工艺流程

2.3　锂离子电池的性能

锂离子电池的典型充电特性曲线如图 6.10-23 所示，可以看出对锂离子电池进行充电采用恒电流与恒电压相结合的方法。以图 6.10-23 的充电曲线为例，当电池先以 1A 恒电流充电时，电池电压随时间升高，当充电 1h 左右，一旦电池电压达到 4.2V 时，即转为恒定 4.2V 电压下继续充电。除选择 4.2V 恒电压外，在恒定电压下，充电电流随时间下降，当电流降至一定数值时，即可停止充电，并视为充电完成。选择上述充电方法是由锂离子电池本身固有特性所决定的，这就是因为锂离子电池不具有水溶液蓄电池中常有的过充电保护机制。一旦过充电，不仅在正极上由于脱嵌过多锂而发生结构不可逆变化，负极上可能形成金属锂的表面析出；而且可能发生电解质的分解反应等付反应。由此导致电池循环寿命的急速衰减，甚至由于反应激烈导致热失控引起电池的燃烧与爆裂等严重安全事故。因此可知锂离子电池的充电特性和充电控制是必须予以特别了解与重视的问题。

一般锂离子电池的最大充电电流取 1C 倍率，恒电压段的最低电流值取 $C/50$～$C/100$ 充电电流。由此在采用 1C 充电时，标准充电时间一般总计约 2.5～3h 时，其中恒电流充电阶段一般为 1h 左右，充入电量约为满充电的 80%～90%；恒电压阶段需 1.5～2h，只充入剩余的 10%～20%电量。若减小充电电流，如采用 $C/2$ 或 $C/5$ 时，总计充电时间将会延长至 4h 或 5h。

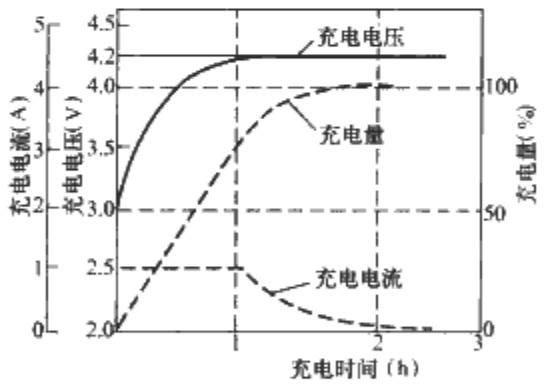


图 6.10-23　小型锂离子电池的典型充电曲线

基于锂离子电池的上述充电特征，目前由锂离子电池组装成的电池块或组件（Battery Pack），即使只含一只单体电池（标称电压 3.7V）的电池块，也都带有控制电路，该类电路一般具有防止过充电、短路和过电流的功能。但是对多于三个电池的电池块或组件而言，其采用的控制电路要复杂得多。

锂离子电池的典型放电曲线分别如图 6.10-24(a)和(b)所示。其中图 6.10-24(a)显示出电池的典型倍率放电能力，而图 6.10-24(b)显示出电池的放电特性与温度的关系。显然

锂离子电池常温下具有高放电倍率能力(可以以 2C 连续放电，仍然可获得接近 95%左右的标称容量)和高的放电电压平台(3.5～3.7V 间)；宽广的工作温度区间(－20℃～60℃)，经过特别设计和选择合适的电解质配方，还可延至－40℃下工作。

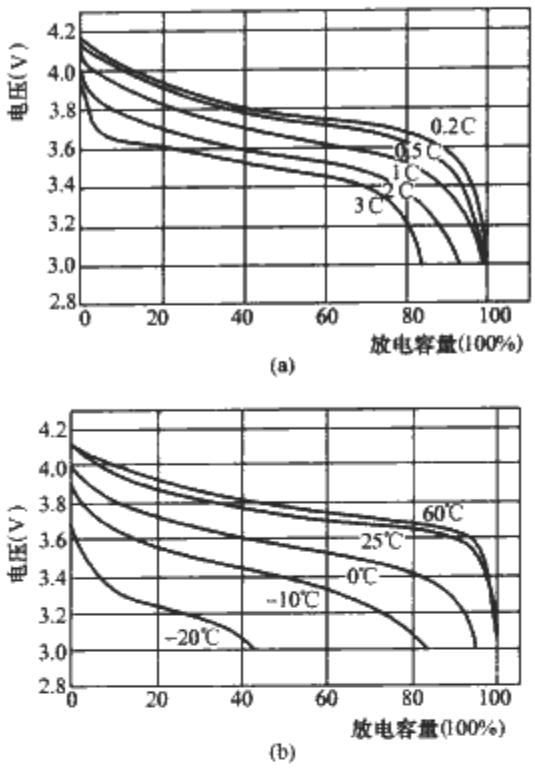


图 6.10-24 锂离子电池典型的放电曲线
(a) 25℃时不同倍率下恒电流放电；(b) 在不同温度下以 0.5C 倍率下恒电流放电

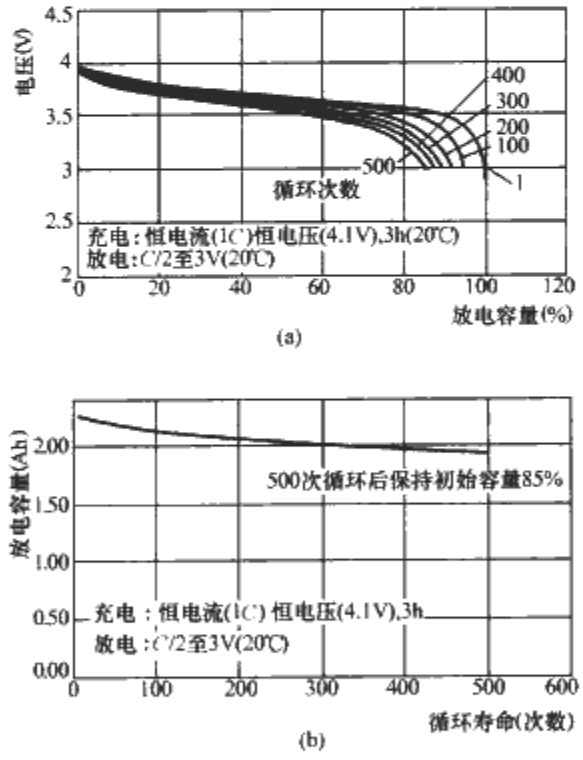


图 6.10-25 锂离子电池的典型循环寿命特性曲线
(a) 不同循环次数时的放电曲线；(b) 放电容量随放电次数的变化曲线

作为小型电器电源使用，圆柱形和方形锂离子电池都是在 100%DOD 条件下进行充放电循环，而且多数考核条件都选择 1C 放电倍率进行。在这种条件下，电池的典型循环寿命如图 6.10-25 所示。可以看出锂离子电池的深充放电性能优异，特别适合各种小型用电器具（如手机、笔记本机算计、数码照相机与摄像机等）应用。

此外锂离子电池的自放电比传统镉/镍和金属氢化物/镍电池都低得多，一般只有(5%～7%)/月。锂离子电池上市以来，电池技术和产品性能水平不断提高，应用领域也不断扩展。其中以手机用方形电池和笔记本机算计用圆柱形 18650 电池为例，它们的比能量和容量已经提高了一倍以上，分别如图 6.10-26(a)和(b)所示。

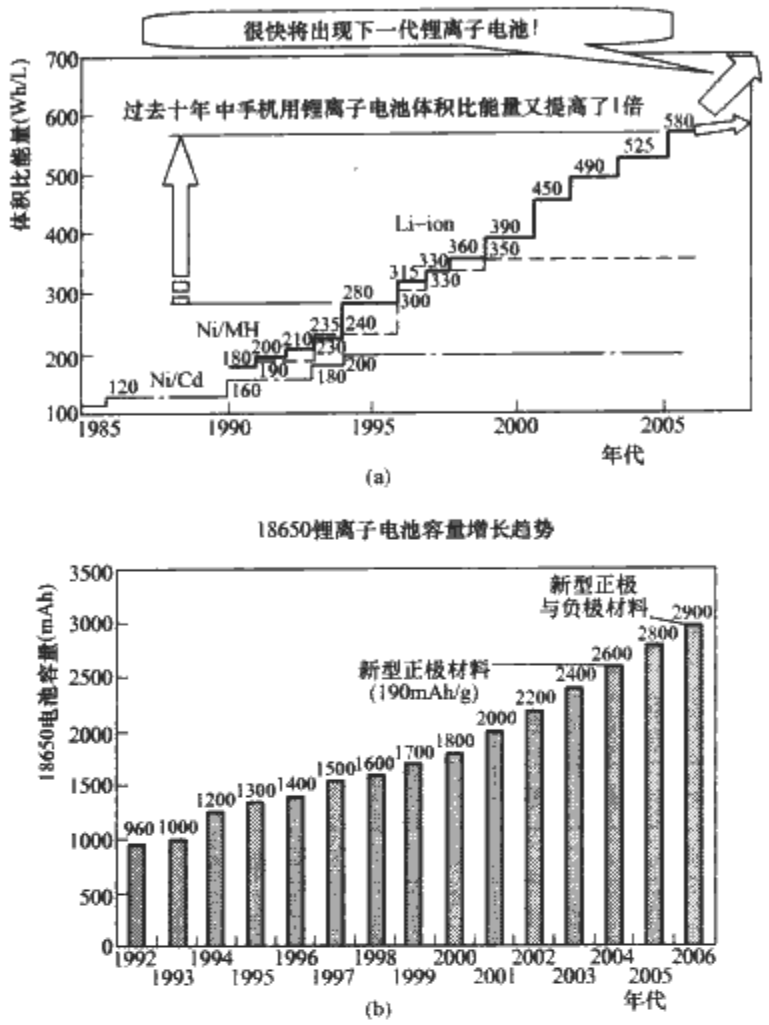


图 6.10-26 锂离子电池的性能增长趋势
(a) 手机用方形电池；(b) 笔记本计算机用圆柱形电池

由图 6.10-26（b）看出，18650 电池的容量已从其问世时的不到 1000mAh 提高至 2900mAh。图中标明当电池容量提高至 2600mAh 以上时，开始采用新的正极材料或正、负极材料。事实上新型 $LiMnCoNiO_2$（如 $LiMn_{1/3}Co_{1/3}Ni_{1/3}O_2$）作正极材料（或混合使用）和新型非碳负极材料已经得到应用，如表 6.10-11 所列。

我国自 1993 年在天津 18 研究所首先开展锂离子电池研究以来，产业化与商品化发展异常迅速，2006 年年产量已接近 10 亿只，成为仅次于日本的世界第二锂离子电池生产大国。表 6.10-12 和表 6.10-13 分别列出了我国天津力神公司典型小方形锂离子电池和新上市的大容量方形锂离子电池产品规格与性能水平。图 6.10-27 显示出其方形与圆柱形锂离子电池产品的外观照片。

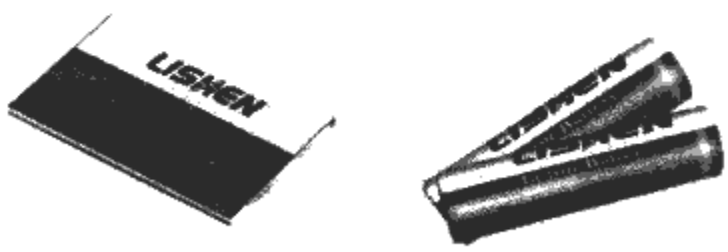


图 6.10-27 我国生产的方形与圆柱形锂离子电池外观照片

目前，我国几家大型锂离子电池企业技术不断进步，电池产品种类不断扩展，产品的性能水平也在不断提高中，如表 6.10-14 所示。

表 6.10-11　　采用新型电极材料的锂离子电池产品

制造厂商	电池型号	说　明	容　量 (Ah)	最高电压 (V)	最低电压 (V)	比能量 (Wh/L)	正极材料	负极材料
索　尼	US18650G8		2.55	4.2	3	545	$LiNiCoMnO_2$	石　墨
	US14430W1	Nexelion	0.91	4.2	2.5	478	$LiNiCoMnO_2+LiCoO_2$	无定型锡复合物
三　洋	UR18650T		2.60	4.4	3		$LiNiCoMnO_2+LiCoO_2$	石　墨
松　下	CGR18650	PSS	2.40	4.2	3		$LiNiCoMnO_2$	石墨
	CRG18650	新 PSS	2.90	4.2	3	600	$LiNiCoMnO_2$	改进石墨

表 6.10-12　　我国典型小方形锂离子电池的规格与性能参数

电池型号	标称容量 (mAh)	标称电压 (V)	内　阻 (mΩ)	重　量 (g)	最大充电电流 (mA)	最大放电电流 (mA)
383460	800	3.7	≤70	16±1	1C	2C
383048	600	3.7	≤70	14±1	1C	2C
043041	500	3.7	≤70	11±1	1C	2C
043048	710	3.7	≤70	14±1	1C	2C
043443	650	3.7	≤70	14±1	1C	2C
043450	800	3.7	≤70	17.5±1	1C	2C
053040	560	3.7	≤70	14±1	1C	2C
053048	760	3.7	≤80	17±1	1C	2C
053438	700	3.7	≤70	15±1	1C	2C
053443	820	3.7	≤70	18±1	1C	2C
053450	1000	3.7	≤70	21±1	1C	2C
063048	800	3.7	≤70	20±1	1C	2C
063450	1100	3.7	≤70	23±1	1C	2C
103450	1800	3.7	≤70	37±1	1C	2C

充电电压 (V)	放电终止电压 (V)	充电温度 (℃)	放电温度 (℃)	长　度 (mm)	宽　度 (mm)	厚　度 (mm)
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	49.7±0.5	33.6±0.3	4.0±0.2
4.2±0.05	3.0	0～45	−20～60	47.5±0.2	29.3±0.2	4.05(+0.25,−0.15)
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	40.3±0.2	29.4±0.2	4.3±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	47.6(+0.15,−0.2)	29.3±0.2	4.3±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	42.5±0.5	33.5±0.3	4.3±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	40.6±0.2	33.55±0.15	4.3±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	39.6±0.5	29.5±0.9	5.2±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	47.6±0.2	29.5±0.3	5.2±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	35.6±0.2	33.8±0.2	5.3±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	42.5±0.3	33.8±0.2	5.2±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	49.7±0.3	33.8±0.2	5.3±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	46.8±0.5	29.65±0.25	6.2±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	40.7±0.2	33.6±0.2	8.2±0.2
4.2±0.06	3.0	0～45	−20～60	49.4±0.4	33.6±0.3	10.4±0.4

表 6.10-13　　我国新开发的大容量方形锂离子电池的规格与性能参数

电池型号	标称容量 (Ah)	标称电压 (V)	内　阻 (mΩ)	重　量 (g)	最大充电电流 (A)	最大放电电流 (A)	充电电压 (V)	放电终止电压 (V)	厚×宽×高 (mm)
147087	5.4	3.6	≤20	≤205	1C	2C	4.2±0.05	2.75	14×69×70
146986	6.5	3.6	≤19	≤210	1C	2C	4.2±0.05	2.75	14×89×88
173665	4.4	3.6	≤25	≤97	1C	2C	4.2±0.05	2.75	17×36×85
204075	5.4	3.6	≤22	≤140	1C	2C	4.2±0.05	2.75	20×40×75
277061	6	3.6	≤17	≤245	1C	2C	4.2±0.05	2.75	27×70×61
277067	10	3.6	≤15	≤275	1C	2C	4.2±0.05	2.75	27×70×67
277066	13	3.6	≤13	≤360	1C	2C	4.2±0.05	2.75	27×70×66

表 6.10-14 我国电池产品的典型号及相应容量的提升水平

电池型号	Q1 2005	Q2 2005	Q3 2005	Q4 2005	Q1 2006	Q2 2006	Q3 2006	Q4 2006
方形电池(Prismatic Cell) 电池容量单位(mAh)								
ICP43048	710	710	710	710	710	780	780	780
ICP43443	700	700	700	710	710	710	750	750
ICP43450	815	815	815	815	815	920	920	920
ICP53048	820	820	820	820	850	850	850	850
ICP53436	660	710	710	710	710	760	760	760
ICP53443	850	850	850	850	900	900	900	900
ICP53450	1030	1030	1030	1030	1030	1130	1130	1130
ICP63048	900	900	900	950	950	950	950	1000
ICP63450	1050	1130	1130	1130	1130	1230	1230	1230
ICP103450	1750	1750	1750	1850	1850	1850	1900	1900
圆柱形电池(Cylindrical Cell) 电池容量单位(mAh)								
14500	780	780	780	780	780	780	800	800
17500	1000	1000	1000	1100	1100	1100	1100	1100
18500	1500	1500	1500	1600	1600	1600	1600	1700
18650	2200	2200	2200	2400	2400	2400	2600	2600
聚合物电池(Laminated Cell) 电池容量单位(mAh)								
PP383562	800	800	800	800	900	900	900	900
PP423467	1050	1050	1050	1050	1100	1100	1100	1100
PP523759	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1350
PP5545136	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	4200
PP0665100	4000	4000	4000	4000	4100	4100	4100	4100
PP073565	1500	1500	1500	1500	1600	1600	1600	1600
软包装电池(Laminated Cell) 电池容量单位(mAh)								
SP383555	750	750	750	750	780	780	780	800
SP383450	720	720	720	800	800	800	800	800
SP042025	152	152	152	152	160	160	160	170
SP042532	210	230	230	250	250	250	250	280
SP042030	190	190	190	190	200	200	200	200
SP552030	250	250	250	250	250	280	280	280
SP051230	140	140	140	140	140	150	150	150
SP053759	1250	1250	1250	1250	1250	1300	1300	1300

注 表中电池容量的测试条件为 0.2C 放电至 3.0V。

2.4 聚合物锂离子电池

所谓聚合物锂离子电池实质上是指在电池内形成胶体聚合物电解质的锂离子电池。胶体聚合物电解质则是盐和有机溶剂同时溶于聚合物或与其混合形成的一种离子导电材料。典型的用于锂离子电池的胶体电解质为由 PVDF-HFP、$LiPF_6$ 或 $LiBF_4$ 盐和碳酸酯类溶剂形成的膜，其外观十分近似于橡胶。胶体电解质的可能优越性在于当聚合物吸收液相组份后，电池发生漏液现象几率更低。由 PVDF-HFP 共聚物形成的塑性聚合物薄膜可直接用作为隔膜，同时将它们混入电极活性物质中就得到了塑性电极。由此将两个电极与电解质(隔膜)紧密粘结成“三明治”结构，如图 6.10-28(a)所示。由此可以采用类似包装食品的铝/塑膜进行封装(封装前注入电解质溶液)，就得到了一个典型的聚合物锂离子电池，如图 6.10-28(b)所示。

对上述电池制造过程可作如下简述：用于聚合物锂离子电池的电极可以采用粘稠混合物（一种浆料）浇铸制造而成，浇铸用的浆料是由活性物质（如 $LiMn_2O_4$ 或 $LiCoO_2$ 正极材料；MBMC 石墨或石墨纤维负极材料）、导电添加剂（即超级导电性碳）、可溶性聚合物粘合剂（即 PVDF-HFP）、中等至低等挥发性塑化剂（譬如二丁基酞酸酯或碳酸丙烯酯）和处理助剂（包括表面活性剂、防氧化剂等）以及挥发性溶剂（譬如丙酮或甲基乙基酮）。塑料隔膜也可以由均质的浆料浇铸成型，这种浆料是由同种聚合物粘合剂（PVDF-HFP）、硅烷气化的氧化硅或氧化铝和塑化剂在类似的挥发性溶剂中配制而成。一般塑化剂还可以促进电极和隔膜之间形成牢固的接合。通常，同一的或类似的聚合物粘合剂一般都是选择基于商品化的 PVDF-HEP

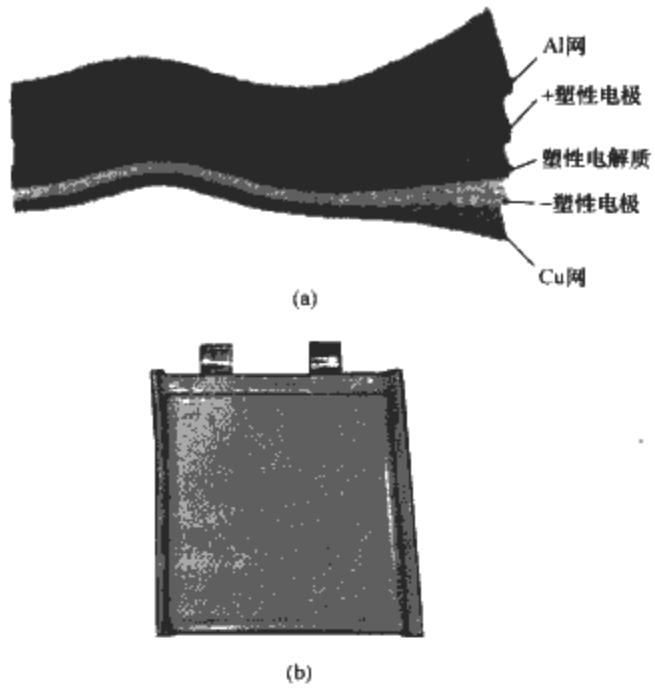


图 6.10-28　典型的聚合物锂离子电池
（a）聚合物锂离子电池的构成；（b）由铝/塑膜封装成的聚合物锂离子电池

材料（聚—偏氟乙烯与六氟丙烯共聚物），它既用在电极中，也用在隔膜中，以便促进层压期间各层之间的结合。也可以采用其他聚合物、共聚物以及它们的混合物，如 PVDF-CTFE（CTFE=三氟氯乙烯）、聚氯乙烯（PVC）和聚丙烯腈(PAN)。

电极带随后经过致密化压制，再与金属拉网集流体相结合。其中，铜拉网用于负极，铝拉网用于正极，并采用加热的双棍层压机或平行板压力装置将电极带与集流网结合在一起。最后，将电极与放置在电极间的塑料或微孔隔膜层压在一起，就构成了三合一电对。

上述电对以前需要进行去塑化剂（萃取或其他方法）的操作，随后装进不透气、柔软的多层聚合物——铝膜制成的复合袋中，在减压和提高温度下进行干燥以便移出任何吸收的水分，用一定量的液体电解质溶液进行活化，并加以密封。液体电解质溶液迅速地吸收到电极和隔膜的微孔结构中，由此使液体电解质从电池中溢出是极不可能的。随着技术发展，目前聚合物锂离子电池已可以采用与液体锂离子电池完全相同的工艺流程制造（包括采用卷绕式电极），然后在注入含聚合物与引发剂电解质溶液后，在电池内实施聚合过程。

显然，这种电池与不使用单体挥发性液体组分的固体聚合物电解质电池是完全不同的。目前的真正固体聚合物电解质室温电导率太低，故正在发展的固体聚合物锂电池只能工作在 40～80℃；而现在的“聚合物”锂离子电池却结合了低黏度的液体组分，提高了电解质的电导率，使这类电池可以在室温下工作。

当今聚合物锂离子电池的质量比能量和体积比能量都在一定程度上超过了液体电解质锂离子电池的报道水平。由于这两种电化学体系使用材料组成的质量与体积份额都大致相同，因此两者的差别可以归之为包装材料和包装结构的不同，即聚合物电池采用轻而薄的包装材料，还更加有效的利用了空间。$C/LiCoO_2$ 和 $C/LiMn_2O_4$ 聚合物锂离子系列电池的厚度可以从 1.2～8.4mm，但其中 3.5～4.0mm 厚的电池比较典型。实用的容量范围可从 0.5～8Ah，而实用聚合物电池厚度的下限为 0.5mm。$C/LiCoO_2$ 电池已可输出 150～230Wh/kg 和 350～550Wh/L；而 $C/LiMn_2O_4$ 电池可输出 130～144Wh/kg 和 235～300Wh/L。

由于液体电解质电池中，电解质也能几乎完全地由电极和隔膜所吸收。故现在采用铝/塑膜包装结构也已经推广至液体电解质体系，常称其为“软包装”电池。同时这类电池的容量与尺寸也进一步扩大至数十安时的电池，甚至到了 100Ah 以上。

聚合物锂离子电池的充电特性和充电控制要求与液体锂离子电池完全相同，也是恒电流和恒电压联合使用，充电的恒电压一般也是 4.2V 或 4.1V。电池的放电特性也基本与液体锂离子电池类同，如图 6.10-29(a)和(b)的典型放电曲线所示。显然聚合物锂离子电池的倍率放电能力和低温性能一般略低于同体系的液体电解质电池，但基本上依然可以满足使用要求。特别是采取特殊设计的聚合物锂离子电池还可能在超高倍率（如 7～10C）连续放电。$C/LiCoO_2$ 聚合物锂离子电池在 100%DOD 下的循环寿命也能达到 500 次以上（85%容量保持）；同时可以承受较高温度下的贮存，在 60℃或 80℃贮存后，进行容量再恢复试验时，只观察到有接近 7%的容量损失。

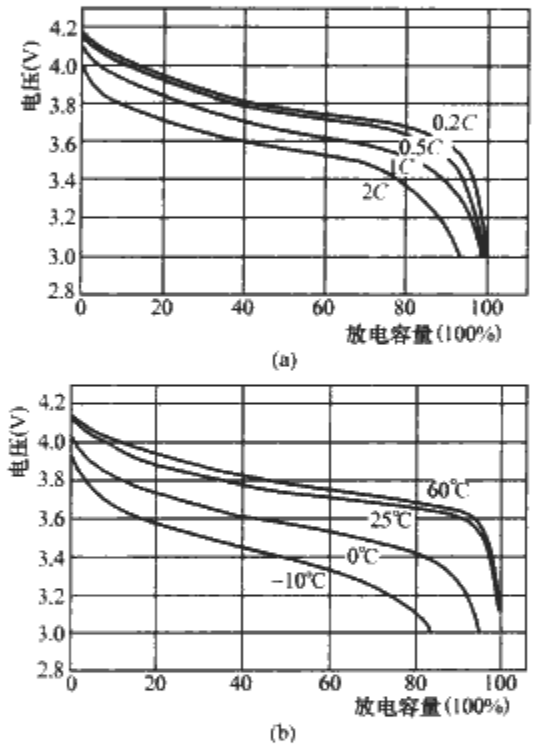


图 6.10-29　锂离子电池典型的放电曲线
（a）25℃时不同倍率下恒电流放电；（b）在不同温度下以 0.5C 倍率下恒电流放电

聚合物锂离子电池的一个最大优势时可以制备得很薄，且形状可任意改变。图 6.10-30 显示了一个厚度仅为 0.5mm 的聚合物锂离子电池，电池具有一定的可弯曲性（如图 6.10-30 下图所示）。该电池是最近由我国深圳邦凯电池公司研制成功的，容量为 25mAh，但脉冲电流高达 250mA，目前正在智能卡的应用中进行应用评价。

与本章后面介绍的固体薄膜锂蓄电池相比，这种超薄形聚合物锂离子电池具有容量大、输出功率高的优势，因此会有良好应用前景。

总之，聚合物锂离子电池（包括软包装液体锂离子电池）以具有独特的薄型因数，显示可与圆柱形和方形锂离子电池可比拟的比特性。此外电池还具有许多适宜商业应用的优异特性，包括良好的倍率能力、低的自放电、长的贮存稳定性和承受电和机械滥用保持安全的能力。这些产品现在已经投入大规模生产，并且正在手机与个人信息装置上不断增加用量。

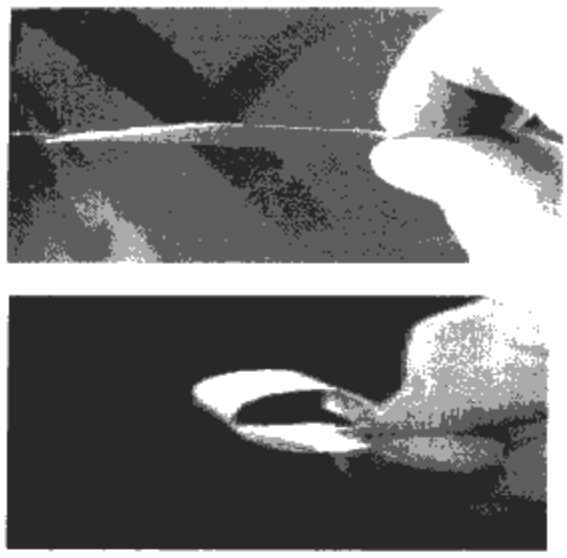


图 6.10-30 厚度仅为 0.5mm 的聚合物锂离子电池

2.5 大容量和高功率锂离子电池

锂离子电池的开发是从小型电池开始的，第一个商品电池就是 18650 圆柱形电池，其容量为 1200mAh；后来发展了系列方形锂离子电池和聚合物锂离子电池，大部分设计在 1000mAh 以内。随着技术进步，18 650 电池的容量已接近 3000mAh，而方形电池设计也趋近 2000mAh。因此便形成了一个没有成文的看法，即将小型电池限定在 5000mAh (5Ah) 以下。由此超过 10Ah，一般就属大容量电池了。而超过 50Ah 容量的电池可看作超大容量电池。由于锂离子电池是蓄电池中比能量最好的体系，因此成为电动车辆（包括电动自行车和摩托车）和舰船的理想候选电源，由此极大地推动了锂离子电池向大容量甚至超大容量电池方向发展。另一方面，随着电动工具和混合动力车的发展，提出采用高比能量和对环境友好的锂离子电池取代金属氢化物/镍或镉/镍电池的要求。这就要求电池具有 7～10C 倍率连续放电或 10～30C 倍率下脉冲放电的能力，由此促使锂离子电池向高功率输出能力方向发展。正是在这种需求推动下，国际上和我国的大容量和高功率型锂离子电池开发正在不断取得重大技术突破。

由于锂离子电池是高比能量电池体系，在设计大容量或高功率型电池时必须尽可能采用高安定性电极材料，即电极正负极材料应具有高的热稳定性等与电池安全性相关的指标。表 6.10-15 列出了几种锂离子电池用正极材料的比较。

由表 6.10-15 中的数据看出在列出的几种正极材料中，尖晶石氧化锰锂（$LiMn_2O_4$）的比容量最低和磷酸亚铁锂（$LiFePO_4$）的电压、密度和扩散系数最低，但是它们的安全性远优于常用材料，且由于资源丰富可使成本较低。另外，Li（NiCoMn）O_2 材料的电化学性质优良，而安全性优于 $LiCoO_2$。因此，目前开发大容量电池和高功率电池，主要集中于采用 $LiMn_2O_4$、Li（NiCoMn）O_2 和 $LiFePO_4$ 三种正极材料或适当的混合材料。但是它们各自都有自己的明显缺点，如 $LiMn_2O_4$ 的循环与贮存稳定性（特别是在较高温度下）较差；$LiFePO_4$ 本身导电性差，且密度较低，严重制约着电池比能量和比功率的提高等。因此致力于这些材料的改进研究一直是材料界和电化学界的重点方向。

下面对采用这些材料研制和生产出的大容量和高功率电池作一说明：

（1）电动工具用高功率锂离子电池。目前无线电动工具使用越来越普遍，对电池的年需求量已经达到约 5 亿只，因此形成了蓄电池的一个巨大市场。由于 Ni/Cd 电池具有优良的功率输出能力，尽管它存在污染环境的问题，但现在依然是电动工具的主导产品。然而随着对环境保护的呼声越来越高，最终淘汰 Ni/Cd 电池势在必行。由此电动工具制造商逐渐看好锂离子电池取代的可能性，并积极加快了这一发展趋势。

电动工具对电池的主要要求是：

1）高倍率放电和高倍率充放电循环性能优良。

2）工作温度区间宽广。

3）体积尽可能小。

4）质量尽可能轻。

5）电池与电池组安全性高。

按照这些要求，已经有一批电池通过了设计、试验和考核，并正式作为产品投入了配套使用。采用的电池材料体系与电池产品型号祥见表 6.10-16 所列。可以看出目前使用的锂离子电池产品集中于三个型号，18650、26650 和 26700 电池，分别组装成 3.6V、14V 和 28V 电池组供不同电动工具使用。

表 6.10-15 几种锂离子电池常用正极材料的性能

材料名称	比容量 (mAh/g)	电池平稳电压 (V)	扩散系数 (cm^2/s)	密 度 (g/cm^3)	成 本 (美元/kg)	安全性
$LiCoO_2$	140～160	3.7	2.6×10^{-8}	5.01	27	差
$LiNi_{0.8}Co_{0.2}O_2$	170～200	3.6	$10^{-11}\sim10^{-12}$	4.96	13	较差
$LiMn_2O_4$	110～120	3.8	10^{-9}	4.28	6.0	良好
$Li(NiCoMn)O_2$	150～220	3.6	10^{-12}	4.69	10～15	较好
$LiFePO_4$	160～170	3.5	1.8×10^{-14}	3.60	<9.0	优异

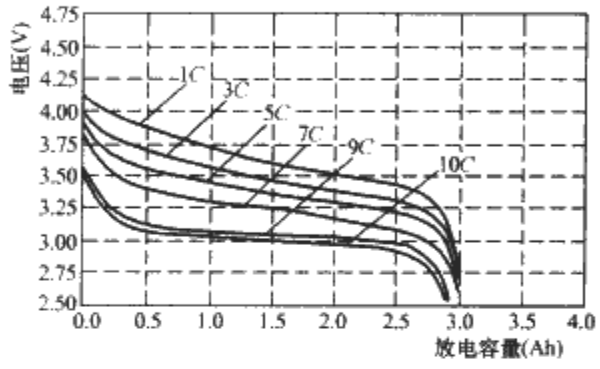
表 6.10-16 电动工具用高功率电池的材料体系、产品型号及其主要性能

制造厂商	电池型号	说 明	容 量 (Ah)	最高电压 (V)	最低电压 (V)	比能量 (Wh/L)	正 极	负 极
索 尼	US18650V	电动工具	1.60	4.2	2.5	250	$LiNiCoMnO_2+LiMn_2O_4$	无定型碳
	US23650VT	电动工具	2.50	4.1	2.5	250	$LiNiCoMnO_2+LiMn_2O_4$	石 墨
莫 利	IMP26700	电动工具	3.00	4.2	2.5	285	$LiMn_2O_4$	无定型碳
A123/比克	26700	电动工具	3.00	4.2	2.5	—	$LiFePO_4$	石墨
力 神	26650 18650	电动工具	3.00	4.2	2.5	270	$LiNiCoMnO_2$	石 墨

图 6.10-31(a)展示的是我国力神公司生产的电动工具用两种型号锂离子电池照片，图 6.10-31(b)则表示 26650 电池的典型高倍率放电特性曲线。



(a)



(b)

图 6.10-31　电动工具用高功率锂离子电池
(a) 产品照片；(b) 高倍率放电特性曲线

显然，这种电池可以以 10C 连续放电，输出接近电池的额定容量 3Ah，此时计算的电池实际比能量达到 100Wh/kg，远高于电动工具用 Ni/Cd 电池。同时该电池的循环寿命可超过 400 次，电池自放电为 7%/月，电池可以在－20℃下工作等，都比电动工具用 Ni/Cd 电池优越得多。表 6.10-15 中采用尖晶石氧化锰锂和磷酸亚铁锂正极材料的高功率电池等产品都已经投入规模生产，并获得了在多款电动工具上的正式应用。

(2) 电动自行车用高容量锂离子电池。电动自行车已经在中国发展成一个新型产业，据报道 2006 年年产量接近 1500 万辆，其中 90%仍然采用铅酸电池作动力电源。但铅酸电池比能量太低，一般只有(30～40)Wh/kg，致使用于自行车的电池质量达 12～15kg。这使高比能量锂离子电池自然受到青睐，从而促进了我国自行车动力锂离子电池的开发、生产与应用。

目前用于电动自行车用锂离子动力电池的设计容量范围在 10～15Ah 间，也有采用两个标准 D 型圆柱形（5Ah）电池并联的设计方案。电池组一般有 24V 和 36V 两种。此类电池的比能量可达 100Wh/kg 以上，因此电池组重量仅为铅酸电池的 1/3 左右，即 3～5kg。为了保证电池有高的安全性，大多选用 $LiMn_2O_4$ 和 $LiNiCoMnO_2$ 作为正极材料，但也有部分产品使用 $LiCoO_2$ 作为正极材料。其中 $LiMn_2O_4$ 经过掺杂或 Al_2O_3 表面处理，充放电过程中的稳定性得到明显改善。图 6.10-32 和图 6.10-33 表示了两种电动自行车电池组的外观照片及其典型的放电特性曲线。

两种电池的放电曲线相比，10Ah$LiCoO_2$/C 电池的放电曲线更为平坦。但是 $LiMnCoNiO_2$/C 电池在全面安全试验评价（特别是它通过了高温 150℃ 热箱试验）上优于 $LiCoO_2$/C 电池，同时成本也略低。图 6.10-32 还显示出 $LiMnCoNiO_2$/C 电池也可以在宽广的温度区间工作。中国科学院北京物理研究所研制出改性的尖晶石 $LiMn_2O_4$ 正极材料，并且投入规模生产。在苏州星恒公司采用这种材料的 10Ah 电动自行车方形锂离子电池实现批量生产，用于配套国内名牌电动自行车，据报道 2006 年装配数量已累计达 7000 辆。图 6.10-34 显示出装配该电池组的电动自行车，该公司电池产品的安全性能获得了美国 UL 试验室的认证。目前电动自行车用锂离子电池的循环寿命在 500 次以上，为了确保使用中的安全，厂商都提供配套的具有恒电压与防止过充电等保护功能的专用充电器。

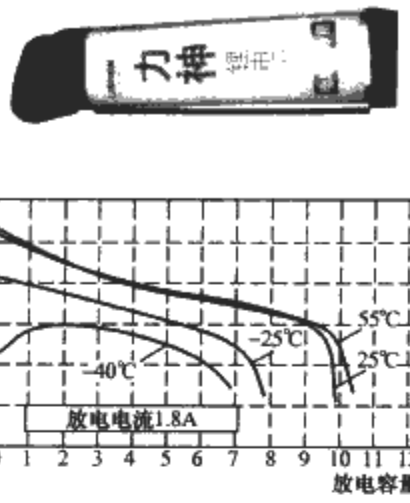


图 6.10-32　标称 24V、10Ah$LiMnCoNiO_2$/C 电动自行车用锂离子电池组及其放电特性曲线

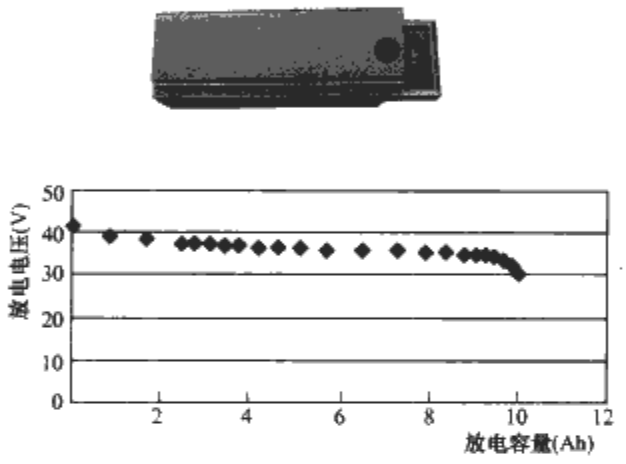


图 6.10-33　标称 36V、10Ah$LiCoO_2$/C 电动自行车用锂离子电池组及其放电特性曲线



图 6.10-34　国产典型装配锂离子电池的电动自行车

(3) 混合动力车（HEV）用超高功率锂离子电池。由于近年来的环保要求和汽油价格剧涨，使国际上混合动力车辆正在加快发展。目前，日本丰田和本田两家汽车公司处于市场领导地位，2005 年两公司总计生产量达 20 万辆。丰田坚信 2006～2007 年可增至 30 万辆，2010 年可增至 50 万辆。而美国 GM 和 Ford 等公司都有加速发展商品混合物动力车辆的计划与目标，美国政府也积极支持可以在家庭汽车库为电池进行充电的（Plug-In）混合动力轿车的发展。从当前

来看，金属氢化物/镍电池仍然是 HEV 应用的主流，但是随着高功率、安全型锂离子电池的研究进展，国际上普遍预计 2010 年前后可以将锂离子电池用于 HEV，并开始规模生产和应用。由此，各国都在竞相发展超高功率锂离子电池技术和产品，其中尤以日本、法国、韩国、中国和美国最为重视。最近法国 SAFT 公司在美国成立一家合资公司，将在美国生产适用于 Plug-in 混合动力车用锂离子电池，其容量范围为 20～40Ah。采用这种电池的混合动力车单独用电池驱动时，可行驶 20～40km，特别适合城市内上班人员使用。

早在上世纪末，美国能源部在“Freedom Car”计划中就提出了对发展混合动力车用先进蓄电池的技术要求，后来又做了修订，如表 6.10-17 所列。

从表中参数可知，整组电池的 10s 脉冲放电比功率为 625～670W/kg；10s 脉冲充电比功率为 500～583W/kg；－30℃下电池组能够满足车辆启动要求（5kW、2s、三次）；而电池组的循环寿命要求达到 30 万次，每次充放电释放或回收能量 25Wh；同时使用寿命要求达到 15 年。此外产品价格指标为 500～800 美元，相当于 1.6 美元/Wh。表 6.10-18 是日本丰田用于 HEV 的锂离子电池具体设计要求。

表 6.10-17 按“Freedom Car”计划修改后的 HEV 电池组技术要求

目 标	辅助功率	辅助功率
特 性	最 小	最 大
脉冲放电功率（10s，kW）	25	40
最大充电脉冲（10s，kW）	20（50Wh 脉冲）	35（97Wh 脉冲）
有效能量总值（kWh）	0.3	0.5
往返程效率（%）	>90～25Wh 循环	>90～50Wh 循环
特定荷电状态下的循环寿命（次）	300k 25Wh 次（7.5MWh）	300k 50Wh 次（15MWh）
在－30℃时冷起动功率（3 个 2s 脉冲，中间 10s 间歇，kW）	5	7
使用寿命（年）	15	15
最大重量（kg）	40	60
最大体积（L）	32	45
产品价格，以每年 10 万组计（美元）	500	800
最高操作电压（V）	400	400
最低操作电压（V）	$0.55U_{max}$	$0.55U_{max}$
最小自放电（Wh/d）	50	50
操作温度范围（℃）	－30～＋52	－30～＋52
允许保持的温度范围（℃）	－45～＋66	－45～＋66

表 6.10-18 丰田用于 HEV 的锂离子电池设计要求

型 号	Vitz 智能块	Prius Ⅲ
上市时间	2003 年 2 月	2008 年 8 月
电池数	4	56
总电压（V）	14.4	201.6
容量（Ah）	12	3.8
能量（kWh）	0.173	0.766
壳体	铝壳	铝壳
尺寸（mm）	120×102×25	120×80×12
正极	$LINiCoAlO_2$	$LINiCoAlO_2$
负极	MPG 石墨	MPG 石墨
隔膜	PP/PE/PP 27μm	PP/PE/PP 27μm
电解液	EC/DMC/EMC-LiPF6	EC/DMC/EMC-LiPF6

目前，法国著名电池公司（SAFT）的超高功率锂离子电池的比功率已达到 1350W/kg，比能量达 75～85Wh/kg 如表 6.10-19 中数据所示。

表 6.10-19 SAFT 公司混合动力车电池产品的技术性能水平

电池参数名称	单位	VL8P	VL16P
额定电压	V	3.6	3.6
标称容量，C/3 下	Ah	8	16
功率，50%DOD，18s 脉冲	W	513	904
尺寸（直径/高度）	mm	47/104	47/178
典型质量	kg	0.38	0.67
质量比能量	Wh/kg	75	85
质量比功率	W/kg	1350	1350
体积比能量	Wh/L	158	186
体积比功率	W/L	2850	2900

此外，日本松下和韩国 LG 报道水平高达 3400W/kg 和 2300W/kg。在模拟工况下的循环寿命测试方面，法国 SAFT 电池已积累近 90 万次（如图 6.10-35 所示），松下电池也达到 22 万次，分别超过或接近了美国 Freedom Car 计划目标。

我国“十五”期间“863 电动车专项”支持了混合动力车用锂离子电池技术的发展，锂离子动力蓄电池比功率已从 2002 年的 491W/kg 增长到 2005 年的 1220W/kg，但模拟工况下的循环寿命只积累到 30 000 次。“十五”初期几乎所有检测的锂离子动力蓄电池都暴露安全性问题（个别严重的发生爆炸与燃烧），但是在电池研制单位不懈努力研究的工作过程中，通过改变电极材料和完善电池结构设计等措施，使受检的单体电池都通过了包括过充电、短路、过放电、挤压和针刺等滥用试验规范要求，说明安全性能有了很大的提高。图 6.10-36 是我国苏州星恒公司生产的混合动力车用锂离子电池组件及采用该电池的同济大学混合动力燃料电池轿车照片。

（4）纯电动车用超大容量锂离子电池。纯电动车（EV）是完全由电池驱动的零排放（Zero Emission）车辆，最受现代社会的青睐。但是长期以来，还没有一种电池体系的性能与价格，可与现在的汽油发动机体系相比拟。因此致力于新型动力蓄电池技术的发展，成为 21 世纪的重要使命。

目前，法国著名电池公司（SAFT）的超高容量锂离子电池的比能量已达 125～150Wh/kg，比功率达到 420～650W/kg，如表 6.10-20 中数据所示。显然作为纯电动车的电池，比能量是较比功率更为重要，因为它与行驶里程直接相关联。

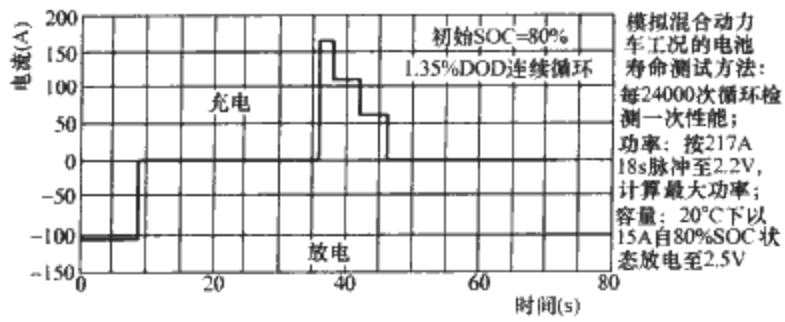


图 6.10-35　SAFT 混合动力车用锂离子电池在模拟工况下的循环性能测试结果

(a) 混合动力车电池模拟工况寿命测试方法；(b) 电池容量与循环次数的关系曲线；(c) 电池最大功率输出与循环次数的关系曲线

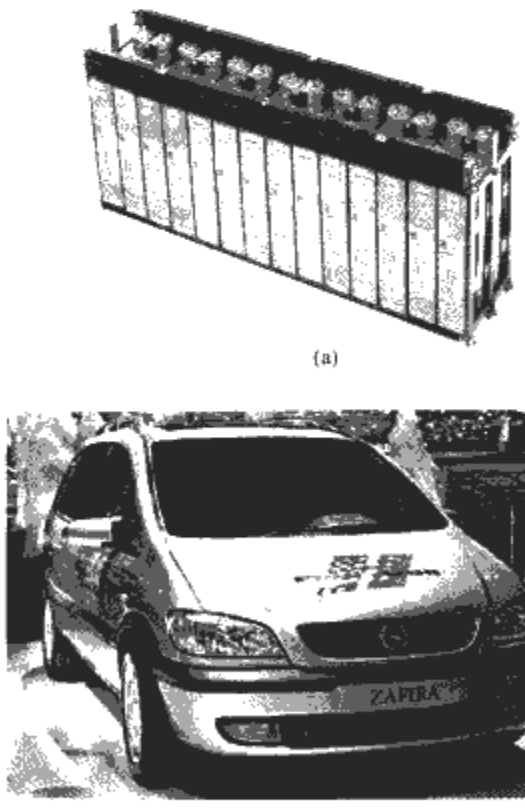


图 6.10-36　我国开发的超高功率锂离子电池及其典型应用

(a) 15Ah 方形 $C/LiMn_2O_4$ 电池组件；(b) 下图采用锂离子电池混合动力的燃料电池轿车

表 6.10-20　SAFT 公司纯电动车电池产品的技术性能水平

电池参数名称	单位	VLE	VL41M	VL27M
额定电压	V	3.55	3.55	3.55
标称容量，C/3 下	Ah	45	41	27
功率，50%DOD，18S 脉冲	W	450	700	420
尺寸（直径/高度）	mm	54/222	54/222	54/163
典型质量	kg	1.07	1.07	0.77
质量比能量	Wh/kg	150	135	125
质量比功率	W/kg	420	650	550
体积比能量	Wh/L	310	285	275
体积比功率	W/L	880	1370	1100

在模拟工况下的深充放电循环（80%DOD）寿命测试方面，法国 SAFT 电池已积累近 2500 次（如图 6.10-37 所示）。电池第 2000 次的放电曲线与第一次放电曲线在初始段几乎重合，仅容量有所下降，电池能量输出总计只下降了 9%。

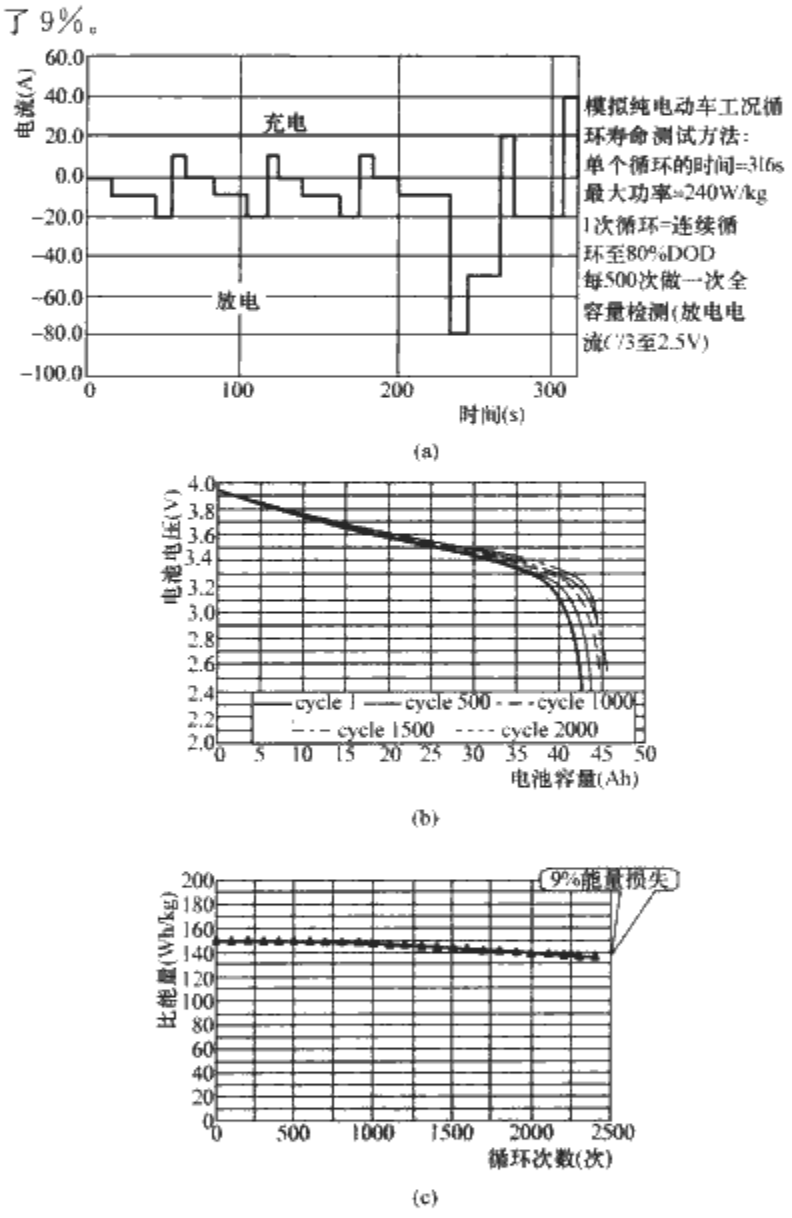


图 6.10-37　纯电动车电池模拟工况寿命测试方法与典型测试结果

(a) 纯电动车电池模拟工况寿命测试方法；(b) 44Ah 纯电动车电池的典型放电曲线 (C/3)；(c) 44Ah 纯电动车电池的能量衰减曲线

我国“十五”863 电动车专项也部分支持了纯电动车用锂离子电池技术的发展，设计与制造出 50～100Ah 容量范围内的多个电池品种（包括圆柱形和方形），电池比能量达到 120Wh/kg，但深充放电（80%DOD）循环寿命还尚只有 600 次。“十五”初期几乎所有检测的超大容量锂离子动力蓄电池都暴露出安全性问题（个别严重的发生爆炸与燃烧），

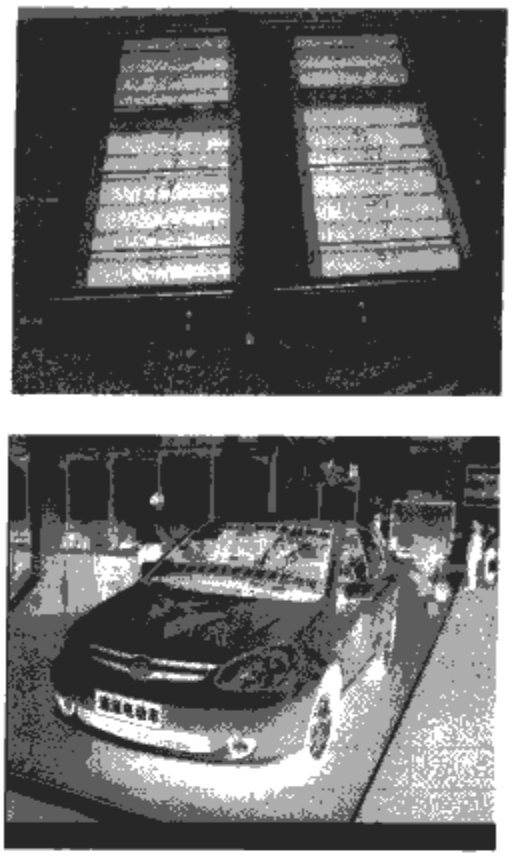


图 6.10-38 纯电动车用锂离子电池组件及采用该电池的纯电动轿车照片

但是在电池研制单位不懈努力研究的工作过程中，通过改变电极材料和完善电池结构设计等措施，部分单位的单体电池通过了包括过充电、短路、过放电、挤压和针刺等滥用试验规范要求，说明安全性能有了很大的提高。图 6.10-38 是我国天津蓝天双环公司生产的纯电动车用锂离子电池组件及采用该电池的天津清源电动车公司纯电动轿车照片。采用 80Ah 电池组的轿车，一次充电行驶 252.7km（40km/h）；电池最高速度达到 123km/h；从 0 加速至 50km/h，需时 6s，而加速之 100/h，则费时 21s；以最高速度可以行驶 30min；车辆爬坡度达到 20%。

由于 2008 年北京绿色奥运的需求，北京已经装配了采用超大容量锂离子电池的公交车，其中的电池由北京中信国安盟固利公司提供，单体电池容量为 100Ah，装车时采用四组并联。电池采用了较为安全的 $LiMn_2O_4$ 正极材料，单体电池比能量达到 100～120Wh/kg。图 6.10-39 是上述电池和装配的公交车照片。

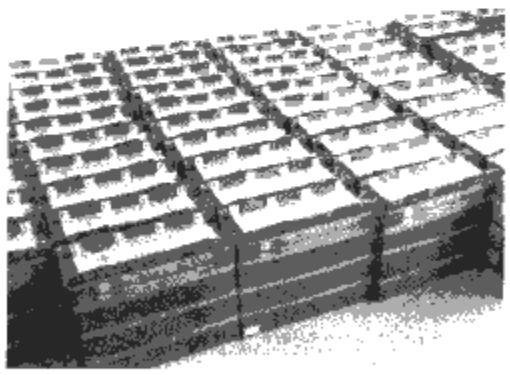




图 6.10-39 纯电动车 100Ah（$C/LiMn_2O_4$）锂离子电池与装配该电池的电动公交车照片

(5) 卫星用大容量、长寿命锂离子电池。以高比能量和长寿命为特征的锂离子电池也引起了军事与宇航领域的极大关注，其中作为卫星贮能电源更是受到青睐。作为长寿命卫星的第一代储能电源采用 Cd/Ni 全密封蓄电池，比能量只有 30～45Wh/kg，而在近地轨道浅充放电使用条件的寿命 1～2 年，同步轨道使用条件[(40～50)%DOD]，寿命 7 年左右；第二代高压 H_2/Ni 全密封蓄电池比能量可达 55～65Wh/kg，在近地轨道浅充放电使用条件的寿命～3 年，同步轨道使用条件（60%～70%DOD），寿命 10～15 年；现在若将锂离子电池用作卫星贮能电源，比能量可比 H_2/Ni 电池又提高了 1 倍以上，达到 120～150Wh/kg；而且在近地轨道浅充放电使用条件的寿命有可能提高至 3～5 年。显然，锂离子电池的宇航应用具有光明的前景。

国际上已经有一系列采用锂离子电池作贮能电源的卫星发射成功，见表 6.10-21 所列。其中，法国 SAFT 和日本 GYT 公司的电池设计各有不同，参见图 6.10-40 和表 6.10-22 的比较说明。

表 6.10-21 卫星用锂离子电池示例

电池制造商/系统制造商	电池规格	飞行器应用	说 明
AEA/COMDEV	1Ah-商品电池（普通商品电池）	超过 14 颗（PROBA，Mars Express）	无均衡电路第一颗航天锂离子电池应用
SAFT/Astrium（欧洲）	38Ah 50Ah（研制中）	超过 4 颗（Amazonas，EutelsatW3A）	有均衡电路首次同步轨道卫星应用（GEO）
Yardney（美国）	8Ah	超过 2 颗（Mars Rover，XSS-11）	小卫星应用
GYT/MELCO（日本）	10～190Ah	超过 2 颗（SERVIS-1，Thaicom-4）	有均衡电路最大的同步轨道卫星应用（GEO）

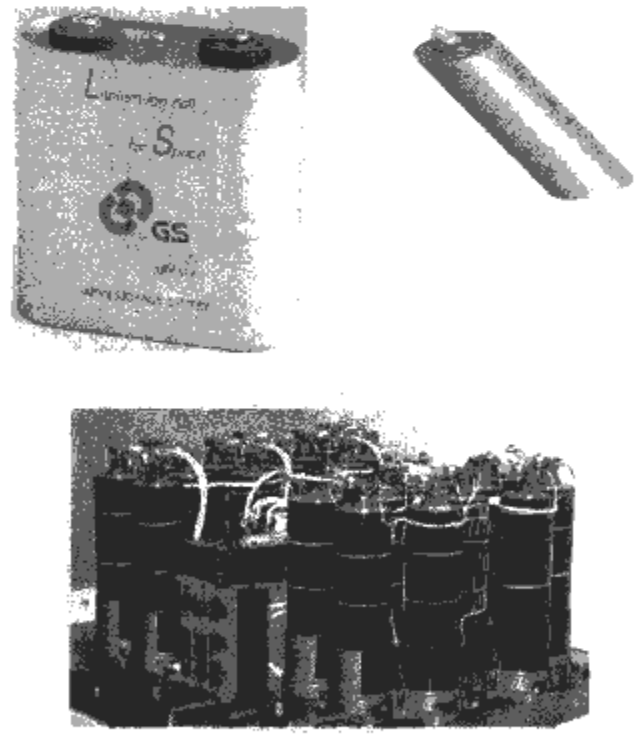


图 6.10-40 航天用锂离子电池单体（扁圆：日本；圆柱：法国）与实用电池组（法国）

SAFT 公司宇航电池的使用寿命预评估采用了下列方法，即电池在两种温度（10℃和 30℃）及不同荷电态下（3.7V、3.8V、3.9V 和 4.0V）进行浮充电，然后周期性检

测电池容量（试验在 25℃下以 $C/3$ 和 $C/10$ 进行）和内阻（测试在每次放电开始进行），由此得出一系列试验结果可供进行评估，典型结果如图 6.10-41 所示。由图上显示的数据清晰看出，宇航锂离子电池在长达 1500 天（约 4 年多）的浮充电期间，由于电池容量在初期有上升现象，故总体上未出现明显衰减（初始容量为 36.8Ah，1500 天浮充电后，仍然高于起始值）。同时也发现选择不同电池浮充电压时，未对容量变化规律产生明显影响。但是周期对电池容量进行试验时，试验温度和放电电流却能反映出电池容量的不同变化趋势。在 60℃下以小电流（$C/10$）试验时，获得电池容量是较高的，但其平均容量一直随浮充电时间增长一直呈下降趋势；而在 25℃下以较大电流（$C/3$）试验时，电池平均容量随浮充电时间增长先上升，再呈下降趋势。上述差别可以归至于高温下电池自放电增大，而它叠加到小的放电电流上，造成了较大的影响。

表 6.10-22　　法国 SAFT 和日本 GYT 公司航天用锂离子电池的设计参数比较

制造商	日本 GYT	法国 SAFT
电池单体形状	扁圆形	圆　形
正极材料	$LiCoO_2$	$LiCo_xNi_yAl_zO_2$
负极材料	石　墨	石　墨
标称容量（Ah）	50	38.6
额定电压（V）	3.7	3.6
质量（g）	1500	1120
尺寸（mm）	50×130×123	直径 54×高度 222
质量比能量（Wh/kg）	123	126
体积比能量（Wh/L）	246	~270

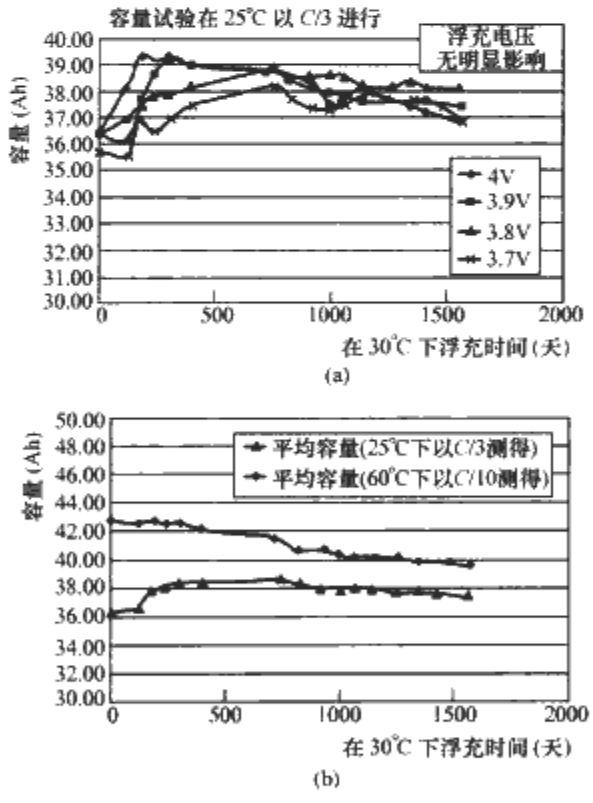


图 6.10-41　宇航锂离子电池的使用寿命评估方法与典型测试结果

（a）在不同荷电态下浮充电；（b）以不同放电制进行周期容量试验

我国宇航锂离子电池也已经取得了技术突破，现在形成了自 10～50Ah 容量范围的电池设计，电池比能量超过了 130Wh/kg。各种模拟空间条件的试验与可靠性考核正在全面进行。由此可以预期，我国锂离子电池在航天器上的应用指日可待。

2.6　锂离子电池的安全分析与注意事项

虽然从反应机理分析，锂离子电池比金属锂蓄电池具有高的安全性。但是作为一种含有高比能量材料和有机电解质的电池体系，一旦发生使电池全部能量在极短时间内释放的话，电池还是会发生安全问题。严重时可能发生爆炸和着火燃烧，造成人身和财产损失。自锂离子电池问世以来，世界不少国家和地区都有过各种小型锂离子电池发生安全事故的报道。其中 2005～2006 年曾先后发生了笔记本计算机锂离子电池和手机锂离子电池燃烧和爆裂事故，更是引起了世界的关注。

（1）锂离子电池的安全分析。像高比能量锂原电池（特别是功率型锂/亚硫酰氯原电池）和其他高比能量电池一样，锂离子蓄电池在正常使用条件下通常是安全的。只是在常称之为滥用条件下就存在发生安全事故的可能性，特别是那些大容量和高功率型电池。这些滥用条件概括起来为四种情况：①电池短路（外部短路或流过特大电流和外部诱发内部短路，如针刺、挤压、振动或冲击等诱发的内部短路）；②电池过充电；③电池在电池组中过放电；④电池遇到高温（或火焰）。

事实上所有化学电池都是决不允许发生短路和投入高温等滥用环境的，因为一旦短路或处在高温中，就意味着电池包含的全部能量将直接转化为热量，发生所谓热失控反应，使内部气体压力剧增，最后短时间内即可导致电池破裂与泄漏，甚至爆炸与燃烧。

然而锂离子电池还有不同之处，即对过充电完全没有内部保护机制。而且电池体系对水十分敏感，故必须进行完全密封。因此当电池处于过充电时，会发生一系列不可逆反应，包括正极脱出过多锂；负极上析出金属锂，并导致产生锂枝晶以及发生电解质溶剂分解反应等。在发生这些反应的同时，伴随着大量热量的产生与积累，从而加速正极等的热分解，同时因氧气和其他气体的析出使内压升高，最终可能导致电池发生排气（压力升高使拉断机构动作），严重时导致猛烈的泄气、破裂并伴随着着火等安全事故。对锂离子电池而言，由于使用有机溶剂，在事故发生时，常常会伴随燃烧现象。

与锂原电池不同，锂离子电池对过充电有一定承受能力，这是因为在过放电时，其电池中的副反应较锂原电池较为简单，此时正极会有沉积锂的反应，而负极上可能有电解质的分解反应。

一般来说小型高容量电池单独使用时，最容易发生的是内部短路。一方面在进行这种电池设计时，一般追求高容量，故采用薄隔膜和高密度电极。这使引起内部短路的几率增高；同时上在制造过程若带入金属微粒杂质，循环过程中就可能在隔膜或电极表面沉积，造成正负极直接连接；而大型电池一般都是组合使用（如电动车动力电池在 200V 以上），则最容宜发生严重过充电导致的事故。

（2）锂离子电池安全试验规范。目前，国内外权威组织相继制订了各种锂离子蓄电池的安全测试标准，具体有：

1）《家用与商用电池调查概要》，即 SU-2054 标准，由 UL 实验室（Underwriters Laboratories）1993 年制定。

2）《锂电池安全标准》，即 UL-1642 标准，由 UL 实验室（Underwriters Laboratories）1995 年制定，第三版。

3）《二次锂电池安全性评价指南》，即 JBA 标准，由日本电池协会（Japan Battery Association）1997 年制定。

4）《蜂窝电话用锂离子电池总规范》（GB/T18287—

2000)。

5)《锂离子蓄电池组通用规范》(GJB 4477—2002)。

6)《道路车辆用动力型锂离子电池标准》;在这份汽车行业标准中提出了更为严格的滥用试验要求,例如动力型锂离子电池在做针刺试验时,应是至少三个以上电池串在一起同时进行。表 6.10-23 表示出国际上常用的电动车电池滥用测试内容与相应的典型测试结果。

表 6.10-23 国际上较为流行的电动车电池滥用测试内容与典型结果

序号	测试项目	测试结果(SAFT 电池)	
		45E 单体电池	L7P 单体电池
1	外短路(100%荷电态)	泄漏	无任何变化
2	过充电(至 200%荷电态)	泄漏	泄漏
3	过放电(至 250%放电态)	无任何变化	无任何变化
4	挤压(100%荷电态)	无任何变化	无任何变化
5	针刺(100%荷电态)	冒烟	冒烟
6	热箱(100%荷电态,130℃)	130℃以上燃烧	150℃冒烟
7	盐水浸泡(100%荷电态)	无任何变化	无任何变化
8	焚烧/辐射热(890℃)	燃烧	将进行

其他还有 IEC 标准、军用标准、空间及航空标准等。国内外电池制造商根据实际都制定了相关的企业标准,有的甚至制定了更为苛刻的指标以确保产品的安全性。

通用的安全测试项目一般分为四项:

1) 电学:过充电、强制过放电和外部短路。

2) 机械:跌落、冲击、针刺、挤压、振动和加速。

3) 热:焚烧、沙浴、热板、热冲击、油浴和微波加热。

4) 环境:减压、浸没、海拔高度和抗菌性。

(3) 锂离子电池安全设计与相应措施。

锂离子电池的安全设计应该包括多重安全机制的应用,包括:

1) 在满足电性能指标要求和安全性两方面做到合理匹配,让电池本身足够安全,并能通过所有规定的滥用试验规范要求。这里应特别强调对电动车动力锂离子电池的设计,应该把选择安全性高的材料放在首要位置(包括正负极材料、电解质材料、厚度适当并具有关闭功能的隔膜以及提高安全性的添加剂等),其次要适当设计单体电池的容量(如大容量电池一般在 50Ah 上下,高功率电池一般在 30Ah 以下),再是在电池内采取必要的防止滥用的措施(如 PTC、机械拉断机构等)。

2) 采取适当的可自动恢复或设定的保护或限制滥用的措施,避免滥用发生(包括限制充电、防止过流、限制过放电的器件或电路等,如示意图 6.10-42 所示)。

3) 采取可更换或可修复的保护或限制滥用的措施,避免滥用发生(包括限制电流机械电流断开器和热熔断丝等)。

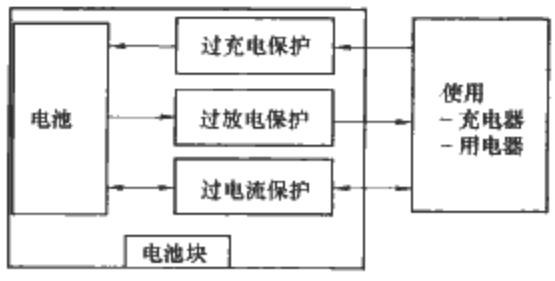


图 6.10-42 电池的外部保护电路功能示意图

4) 采取使电池完全失效,但确保安全的最后措施(如隔膜关闭功能、电池盖拉断机构动作及其他泄放机构等)。

在锂离子电池设计中(特别是动力电池设计)必须采用以上四个层次的功能来保证电池的安全。

(4) 锂离子电池安全使用注意事项。作为用户应该首先了解以上相关知识,正确使用锂离子电池和充电设施。重点是用好充电器,保证电池能充满电,但防止过充电(手机电池及笔记本机算计电池专用充电器有充电指示和充满电指示);同时要绝对避免电池接近高温设施和火焰;绝对避免电池外部短路等滥用条件出现等。

3 固体薄膜锂蓄电池

固体薄膜电池(Solid Thin Film Lithium Battery)又称微电池(Micro Lithium Battery)是 20 世纪 90 年代提出来的新概念。国外某些专家建议,把微电池定义为其底面积不大于 $10mm^2$ 的电池。目前,适用于微电子机械系统(MEMS)的微电池尺度可能定位在毫米级,适用于微芯片的微电池的尺度可能在微米级。微电池的功率范围应在微瓦级至毫瓦级。同时诸如正在发展的“主动式”个人信用卡等,则要求厚度在 5mm 以下的薄膜或薄形电池。同时已经发现可以采用射频(RF)直接为这种电池充电,由此特别适合于固体薄膜蓄电池的发展与应用。

在早期研究工作中提出了水溶液电解质微电池和固体电解质微电池两种体系,虽然前者可以有高的电导率,使电池易于在较高电流(毫安级)下工作,但是碱性电解质的存在,使电池难于密封,使电池不能可靠的工作;为此,主要的研究工作集中于固体电解质锂微电池体系,并已取得了显著进展和进入初步应用阶段。

3.1 固体薄膜锂蓄电池的结构与组成

图 6.10-43 表示出一个典型固体薄膜蓄电池的结构与组成,可以看出除了电极和电解质都是微米级厚度的薄膜以及因制造工艺或使用场合的需要,整个电池要制备在一个衬底上外(材料有氧化铝、石英、钠钙玻璃或硅),电池的基本形态和组成与常规电池没有区别。同时取决于所选择的正负极活性物质种类,其电池中的电化学反应也与相应体系的常规电池相同,只是输出电流、功率和能量显著降低。在这种电池中的正极活性物质可以有两类化合物,即金属氧化物,如 V_2O_5、V_3O_8 和 MnO_2 等;含锂的过渡金属氧化物,如 $LiCoO_2$、$LiMn_2O_4$ 和 $LiNiO_2$ 等。负极活性物质则可以是锂或锂合金,金属氮化物和 LiSTON($LiySiSn_{0.07}O_{1.20}N_{1.72}$)。近年来实现了无负极材料设计,然后采用原位镀锂工艺以解决制备 Li 金属负极的困难。固体电解质目前多采用 LiPON,其成分为氮氧磷锂,如 $Li_{5.5}PO_{5.8}N_{0.22}$,其室温下电导率约

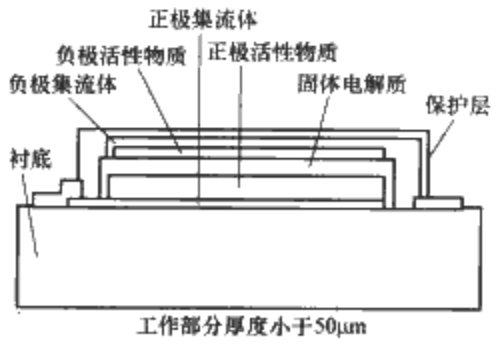


图 6.10-43 典型固体薄膜蓄电池的结构与组成示意图

为 5×10^{-6} S/cm。

3.2　固体薄膜锂蓄电池的制备方法

固体薄膜锂蓄电池的制备可以采用诸多的物理与化学薄膜沉积技术，采用较多的是化学气相沉积法（CVD）、静电喷雾沉积法（ESD）、溶胶-凝胶法（Sol-Gel）、溅射法。也有采用激光熔融沉积法（PLD）等。图 6.10-44 显示出我国复旦大学采用的真空镀膜技术方案。

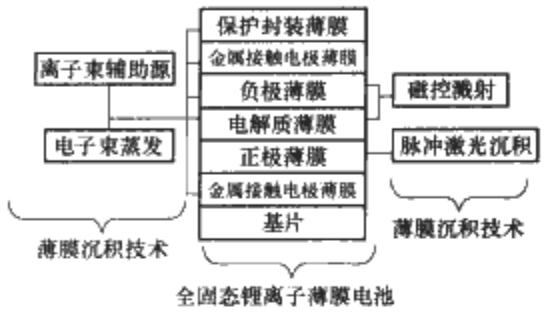


图 6.10-44　固体薄膜锂蓄电池的制备技术说明

显然固体薄膜锂蓄电池的各组分层可以通过磁控溅射和电子束蒸发分别沉积得到。其中磁控溅射可制备负极膜和电解质膜；脉冲激光沉积可制备正极膜（如 $LiCoO_2$ 或 $LiMn_2O_4$ 等正极膜，一般选取厚度为 0.05～5μm 和面积为 0.04～25cm²）；而电子束蒸发可以利用不同的辅助源，在基片（如氧化铝、石英、钠钙玻璃或硅等衬底）上分别沉积正极集流体（金或铂金属薄膜，其又沉积在极薄一层0.01～0.05μm 钴膜，用以改善结合牢固性），并依次再沉积 LiPON（氮氧磷锂）电解质薄膜（厚度 0.7～2μm）、负极膜、负极集流体（0.1～0.3μm）和电池保护膜的上面。

在制备电池时，可以制备出有负极或无负极的电池，分别如图 6.10-45 所示。

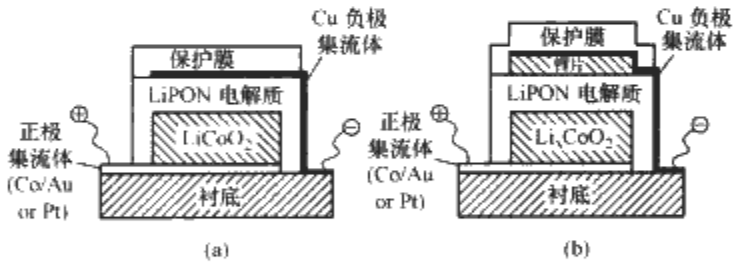


图 6.10-45　固体薄膜锂蓄电池组成示意图
（a）无锂负极；（b）有锂负极

在无负极的电池中，负极上可以现场镀锂，即像锂离子电池那样，对电池进行充电，锂离子就从 $LiCoO_2$ 中脱嵌，而在负极上沉积出来。在有负极材料的电池中，$SiSn_{0.87}O_{1.20}N_{1.72}$（SiTON）、$SnN_x$、$InN_x$ 或 Zn_3N_2 已得到应用。为了兼顾正、负极材料的体积比容量差别，负极的厚度一般取正极的 7%。负极电流集流体一般采用铜、钛或氮化钛（0.1～0.3μm）。为了电池的密封，可以在顶部加上钛膜、或铝膜(0.1μm)的保护层。在有负极的电池中也可以直接采用薄锂箔或通过热蒸发得到纯锂负极。图 6.10-46 显示出在一张聚酰亚胺薄膜上制备出的多个固体薄膜锂蓄电池样品照片，并可驱动电子表正常工作。

3.3　固体薄膜锂蓄电池的基本特性

固体薄膜锂蓄电池具有下述优势，即具有更长的循环寿命（如图 6.10-47 所示）、稳定的快速充放电性能（如图 6.10-48 所示）和无漏液、气胀等液态电池的缺陷等。当然，由于它的超低功率输出，限制其使用范围，即目前局限于微瓦级功率要求的微小型用电器件。

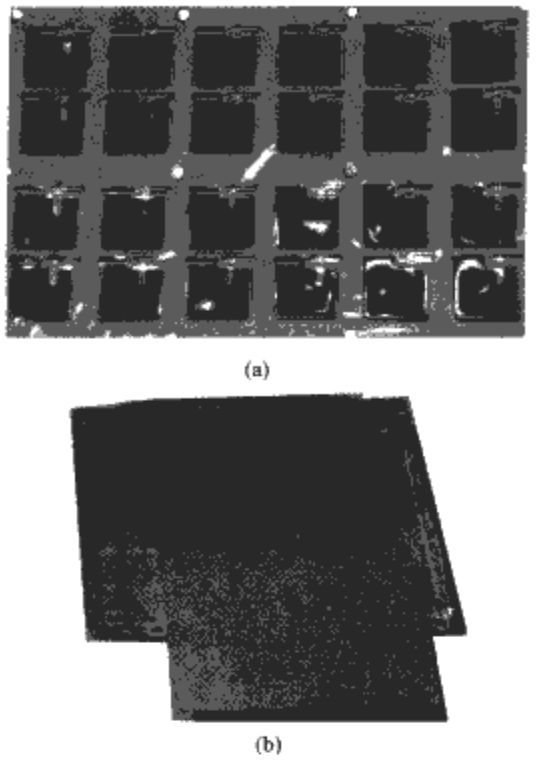


图 6.10-46　样品及其应用
（a）样品；（b）电池样品驱动电子表的照片

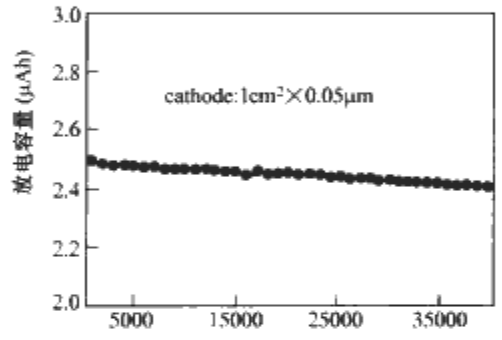


图 6.10-47　固体薄膜锂蓄电池的循环寿命曲线

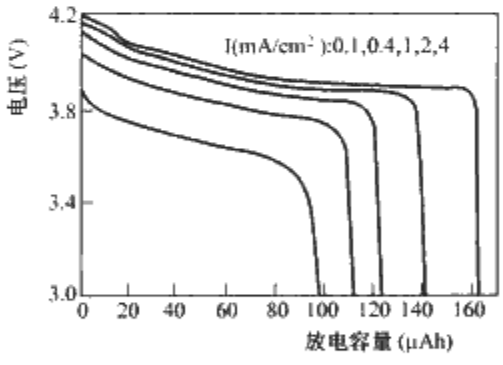


图 6.10-48　固体薄膜锂蓄电池的放电曲线

3.4　固体薄膜锂蓄电池的应用与发展前景

固体薄膜锂蓄电池的主要用途为射频识别系统、智能卡[见图 6.10-49（a）]、自治式传感器、医用植入器件、MEMS、微电子器件与系统[见图 6.10-49(b)]等。

国际上正在启动的智能灰尘计划的目标是为大量分布的传感器网络构作 1mm 规模的传感和通信平台。器件为一粒砂大小，包含：传感器、电源、模拟电路、双向无线（光）通讯、可编程微处理器。显然固体薄膜电池，包括微太阳电池、固体薄膜锂电池等具有迫切的需求和良好发展前景。

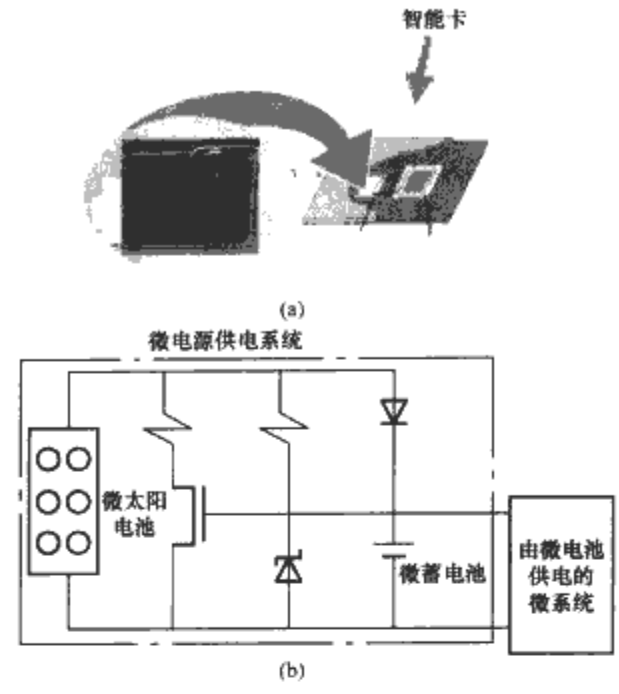


图 6.10-49 固体薄膜锂蓄电池的应用
(a) 固体薄膜锂蓄电池在智能卡上的应用；(b) 固体薄膜锂蓄电池在微电子器件与系统上的应用

第 11 章　钠/硫 电 池

金属钠是碱金属的一种，具有高的负电位和高的比容量，而且它广泛存在于海洋中（NaCl），因此资源极为丰富，是适合的电池材料。但是钠是极为活泼的元素，遇水会发生猛烈反应并析出氢气。因此与金属锂一样，不能在水溶液电解质中使用。

20 世纪 70 年代中期由于发现了一种可传输钠离子的固体材料“β-Al_2O_3”，其化学组成为 $3Na_2O\cdot 6Al_2O_3$，电导率为 0.07S/cm²（300℃下）；后来发现了“β''-Al_2O_3”，其化学组成为 $3Na_2O\cdot 11Al_2O_3$，300℃时电导率提高至 0.33S/cm²。该值比硫酸水溶液和氢氧化钠水溶液的电导率也在同一数量级。由此很快在国际上掀起了以 β''-Al_2O_3 为电解质的钠电池体系研究热，其中采用金属钠作负极和硫（也是一种资源丰富、价格便宜的材料）作为正极的体系首先受到重视。由于钠/硫电池理论的工作温度范围在 290～390℃，一般则选择其工作温度范围在 310～350℃间，在此温度下不仅钠呈液态（其熔点为 97.8℃），而硫作为正极也呈液态（熔点为 112.8℃）。

许多国家（包括中国）都曾致力于对钠/硫电池技术研究，但只有少数国家中的大公司（如日本电力公司）坚持到了取得实用化的成果。同时在发展过程中，也提出了钠/金属氯化物体系（国际上称为 ZEBRA 电池），为解决发展钠/硫电池的过程中遇到的难题提供了一个新的途径。

分析与对照表明，钠硫电池具有材料潜在成本较低、高比能量和比功率、高能量转换效率、长循环寿命、环境温度影响很小等优点。但其局限性也十分明显，首先是该电池体系必须在很高的温度下工作，因此存在对体系的加温和保温问题；其次电池中的化学物质都有很强的反应性与腐蚀性，电池必须在密封状态下工作，因此必须解决封接材料的选择与密封技术问题；再有若电池处于经常的冷、热循环状况时，β''-Al_2O_3 陶瓷电解质易于破裂失效；此时甚至由于熔融硫和钠的泄漏而发生激烈燃烧反应，造成安全事故问题等。

自 20 世纪末钠电池体系终于开始走向了应用，但是还局限于作为储能电池在一些固定场合的使用。

1　工作原理

钠硫电池在放电过程中，金属钠（负极）在 Na/β''-Al_2O_3 界面被氧化，形成 Na^+ 离子，穿过电解质与在正极室被还原的硫结合形成五硫化钠（Na_2S_5）。反应形成的 Na_2S_5 不会溶解于尚存的硫中，因而形成了两相液体混合物。在所有的单质硫相被消耗完毕后，Na_2S_5 可继续逐步转化成单相的多硫化钠 Na_2S_{5-x}。在充电时，化学反应过程正好反过来。两个半电池反应与全电池反应如下所示

$$\text{负极反应}\quad 2Na \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} 2Na^+ + 2e^-$$

$$\text{正极反应}\quad xS + 2e^- \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Sx^{2-}$$

$$\text{全电池反应}\quad 2Na + xS \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Na_2S_x\ (x=3\sim 5)\ E_{ocv} = (2.076\sim 1.78)\text{V}$$

当正极使用氯化镍时，在放电过程中，固态金属氯化物转变成相应的金属和氯化钠晶体。它们的全电池反应为

$$NiCl_2 + 2Na \underset{\text{充电}}{\overset{\text{放电}}{\rightleftharpoons}} Ni + 2NaCl \quad E_{ocv} = 2.58\text{V}$$

采用氯化镍作正极时，当正常放电至终点后氯化镍被耗尽时，电池的工作电压会快速下降。在这个转折点上，$NaAlCl_4$ 开始发生以下的金属还原反应

$$3Na + NaAlCl_4 \rightleftharpoons 4NaCl + Al \quad E_{ocv} = 1.58\text{V}$$

如果继续到把钠消耗完为止，则会引起电解质破裂。但是由于金属铝的存在，电池此时仍然是导电的。这个特点就可以允许较多数量电池串联成电池组。事实上电池电压的快速下降可以作为一个可靠的放电过程达到终点的标志，可用其实现过放电保护。

同时如果电池被过充电，辅助电解质就会被分解产生过量的氯化镍，反应为

$$Ni + 2NaAlCl_4 \rightleftharpoons 2Na + 2AlCl_3 + NiCl_2 \quad E_{ocv} = 3.05\text{V}$$

尽管在过充电的过程中会引起正极电极的分解，但这个反应会阻止因电压导致的 β''-Al_2O_3 电解质的破裂。在实际使用中，单体电池和组合电池都可以被安全的过充电 50% 以上。

由此看出，氯化镍正极和 $LiAlCl_4$ 辅助电解质的引入，明显改善了原钠硫电池的过充电和过放电能力，降低了陶瓷电解质的破裂几率，提高了电池的可靠性与安全性。

2　典型结构

图 6.11-1 给出了两种 β-Al_2O_3 钠电池的单体电池结构图。电池必须在较高的温度下（270～350℃）工作，以保证全部（Na/S）或部分（$Na/NiCl_2$）的电极活性物质处于熔融状态，使 β''-Al_2O_3 电解质有足够大的离子电导率。在图 6.11-1 中也给出了钠/氯化镍电池的结构图，它也同样使用 β''-Al_2O_3 电解质。只是正极材料中含有熔融的辅助电解质（$NaAlCl_4$）和不溶解的活性金属氯化物。

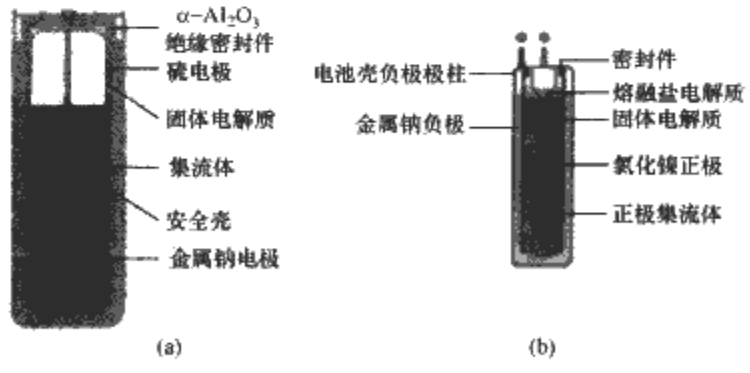


图 6.11-1　两种 β-Al_2O_3 固体电解质的钠电池结构图
（a）钠/硫电池；（b）钠/氯化镍电池

对钠硫电池中使用的主要材料或部件作如下说明：

（1）管式固体电解质。在正极和负极之间使用可传导钠离子的的 β''-Al_2O_3 固态陶瓷作为电解质。在电池工作温度下，其电导率几乎和大多数水溶液电解质相同。此外，由于 β''-Al_2O_3 电解质几乎可以忽略，且不会透过熔融的反应物，

因此 β''-Al_2O_3 还用作熔融电极的隔膜，既防止直接的自放电，又可保证 100%的库伦效率。考虑到储备熔融钠的需要，在现在所有的单体电池设计中，β''-Al_2O_3 电解质的形状都是一端封闭的管子。

（2）负极（钠）。金属钠一般装在 β''-Al_2O_3 电解质管中，它在电池的放电过程中会发生电化学氧化反应，并由耐腐蚀的金属导流条把电流引向极柱（或集流器）。在图 6.11-1（a）中的集流器是由金属杆和金属容器组成的，这种结构常称为“中心钠结构”。由于内部的金属容器可以限制钠流向电解质，因此既使在密封件失效或者电解质有裂隙的情况下，都可以有效的限制金属钠与硫接触的数量，并将钠限制在容器内。

（3）正极（硫）。正极包括硫和一个集流器。硫在放电过程中被还原。在图 6.11-1（a）中，集流器由一个金属外壳和一层压制成型的碳毡或石墨毡组成，碳毡位于电解质和外壳（图中未绘出）之间的位置。碳纤维用于通过绝缘的硫传导电子。

（4）金属外壳。这个构件不仅方便包装，利于安全，并作集流器的功用。在中心钠方式的单体电池中，金属外壳必须能够抵抗熔融态多硫化钠（放电反应产物）的腐蚀。已经在实验中确认的抗腐蚀材料为金属铝或者金属铬，或者它们的合金材料。

（5）密封件。为防止电池中参加反应的物质泄漏到外部环境中，因此电池需要严格的密封。密封件必须耐高温和腐蚀性的液体存在的环境，因此必须进行材料成分选择和结构设计。实际中需要两种密封件：一种是连接 α-Al_2O_3 绝缘件与 β''-Al_2O_3 电解质的密封件；另外一种是连接 β''-Al_2O_3 绝缘件与金属集流片的密封件。通常，两个陶瓷件之间用玻璃封接，这种玻璃在钠、硫及多硫化钠中比较稳定，并且与陶瓷的热膨胀系数相近。金属－陶瓷件之间通常利用一些机械的或者热压连接的方法封接。

在图 6.11-1（b）中的钠/氯化镍电池结构中，金属钠一般位于 β''-Al_2O_3 电解质的外面（外部钠结构），这样设计就可避免使用昂贵的镍容器；外部钠结构电池的另一个优点就是电池的外壳可以采用横截面为方形的结构，从而可在电池组外壳的空间内获得最大的体积利用效率；这种结构的第三个优点就是电池在熔化－凝固循环期间电池的运转情况，此时，不会产生对电解质有害的张力，因此，也就有效地消除了这一潜在的失效模式。正极本身被包含在电解质管内。在完全充电的电池中，正极是被部分氯化为二氯化镍的多孔金属镍基体，基体中未被氯化的镍还起集流片的作用。大约会有 30%的镍参加单体电池的化学反应。镍基体被浸渍在 $NaAlCl_4$ 熔融盐中。在钠/氯化镍电池中钠电极不象钠/硫电池中的钠电极那么复杂，因为在钠/氯化镍电池不必考虑安全性问题。解决单体电池的外壳体与电极的密封问题与钠/硫电池的解决方法一样。在放电过程中，正极的化学反应从固态镍结构的外表面发生，反应继续进行，逐渐增加还原镍的厚度。这种向核心收缩的过程使得电池的内阻在放电过程中增大，因为有效的参加反应的氯化镍的面积在不断地减小。与钠/硫电池相比，钠/氯化镍电池放电过程中的化学反应有另外一个明显的优点，即电池可以安全的用放电产物（金属镍和镍盐）生产组装，然后再被充电。

经过反复研究与改进，最后研制与生产出可以进入实际演示评价和应用的产品，其中图 6.11-2 示出几种典型的 β''-Al_2O_3 钠电池产品，包括三种尺寸钠硫电池和一种钠/氯化镍电池。

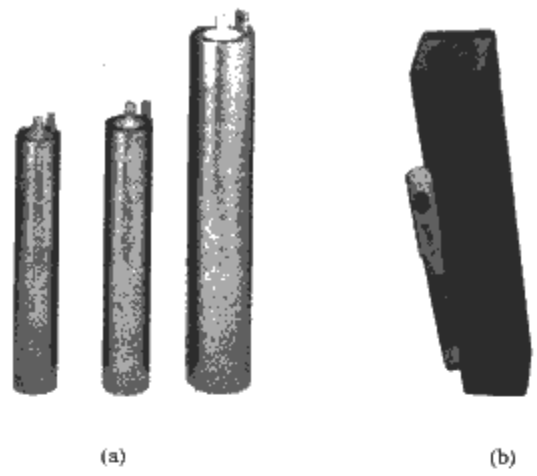


图 6.11-2 典型的 β''-Al_2O_3 钠电池产品

（a）三种尺寸钠/硫电池，最大的单体电池尺寸为 ϕ91mm×515mm；（b）钠/氯化镍电池，尺寸为 36mm²×232mm

3 基本特性

图 6.11-3 显示出钠/硫电池的基本特性，图中表示出钠/硫电池的开路电压和工作电压（充电和放电）分别与电池放电深度的函数关系。当放电深度达到 60%前，由于处于 S 和 Na_2S_5 两相混合物状态，开路电压一直为常数（2.076V）。当 S 和 Na_2S_5 两相混合物逐渐转变为单相的 Na_2S_x 时，电压开始线性的下降，直到选定的放电终止电压为止。放电终止电压确定为开路电压 1.78～1.9V 的区间，其中接近 1.9V 时对应产物 Na_2S_4 形成；而接近 1.78V 时对应产物 Na_2S_3 对应的形成。一般都不希望终止电压低于 1.9V，这是因为当产物 Na_2S_x 中的 x 减小时，产物的腐蚀性增强；同时要防止由于电池组内部存在的不均匀性（例如温度或者放电深度），使局部的单体电池产生过放电。如果反应产物超过了 Na_2S_3 还继续放电，就会再形成另外一种两相混合物，其中的一种为 Na_2S_2。Na_2S_2 电阻很高，致使可充放电性很差，并会导致电解质结构的破坏。从图 6.11-3 中还可以得到钠/硫电池电化学体系所具有的另外几个特点。例如，在充电程度较高的状态下，由于形成了具有绝缘特性的纯硫，所以电池的充电电在充电程度较高的状态下由于形成了具有绝缘特性的纯硫，所以电池的充电电压急剧上升（也表现为电池内阻较大）由于同样的原因，在放电开始时，单体电池的电压会有轻微的降低。在 C/3 放电倍率下，单体电池的平均工作电压接近 1.9V。钠/硫电池电化学体系的理论比能量为 755Wh/kg（到开路电压为 1.76V）。尽管在首次充电时所有的金属钠不会都被还原，但电池还可以放出理论容量的 85%～90%。

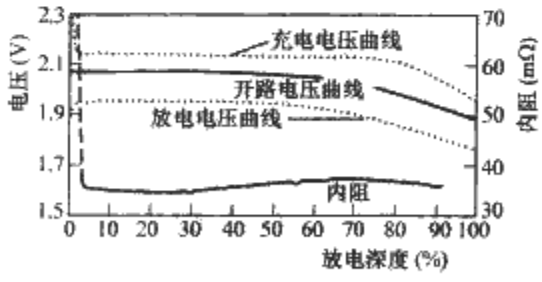


图 6.11-3 钠硫电池的典型特性曲线

此外，所有参加反应的物质和反应产物都呈熔融状态，这就消除了经典的与电极形态变化引起的电极衰退机理，从而使钠/硫电池显示长的循环寿命，如图 6.11-4 所示。

如图 6.11-5 所示，钠/氯化镍电池的开路电压为

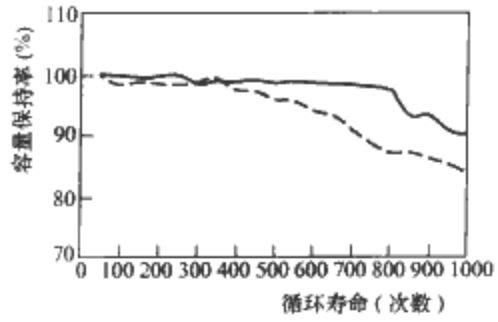


图 6.11-4　钠/硫电池典型的循环寿命特性曲线
（放电倍率为：$C/3$；充电倍率为：$C/5$）

2.59V，高于钠硫电池的 2.076V。电池采用 $C/4$ 与 $C/2$ 放电时都能放出额定容量的 100%，且工作电压可在 2.4V 左右，比钠硫体系的 1.9V 左右显著提高。同时与钠硫电池不同，充电曲线较为平稳，也未出现明显上升的特征。

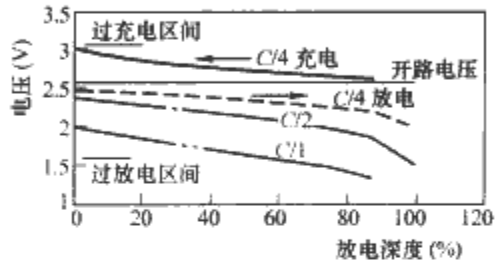


图 6.11-5　钠氯化镍电池的典型特性曲线

4　典型产品的尺寸、主要特性与应用

4.1　典型产品的尺寸和主要特性

表 6.11-1 列出了典型钠硫电池产品的尺寸和主要性能，这些电池是可用于组装贮能装置使用的电池组。

表 6.11-1　贮能装置用的钠/硫单体电池的尺寸及主要性能要求

尺寸（mm）		容量（Ah）	质量（g）	体积比能量（Wh/L）	重量比能量（Wh/kg）	体积比功率（W/L）
直径	高度					
62	375	160	2000	285	160	36
68	390	248	2400	340	202	43
91	515	632	5400	370	226	46
64	430	176	2700	240	120	60
75	400	280	4000	300	133	—
44	114	30	345	345	170	360

目前所有为移动装置（如电动车辆）研发钠/硫电池技术的计划都几乎全部停止了，主要问题是如何维持该电池的高温条件问题，因为一旦经常处于高低温交变条件，β''-Al_2O_3 管的寿命会大大缩短；另一个问题是安全问题，一旦发生车辆碰撞造成钠与硫的直接接触，会引起燃烧甚至爆炸。

但是已开发出 20～200Ah 的钠/氯化镍体系电池，试图找到在移动装置上应用的可能性。其中随着电池技术的不断进步，电池的容量和电池的脉冲功率能力都得到了提高（尤其在接近放电末期），在 80%的放电深度下，目前电池的功率是早期电池的 2.5 倍，如图 6.11-6 所示。电池的改进主要包括：①使用带沟槽的或十字形形状的电解质降低了正极的厚度，并增加了 β''-Al_2O_3 电极的面积；②在镍正极中引进了铁作为掺杂剂，经优化和改进后的电极组分，可使电池的容量增加 20%到 40%。由于年代初期的“ZEBRA”电池未曾发生过实质性质的失效，显示其具有非常高的可靠性。

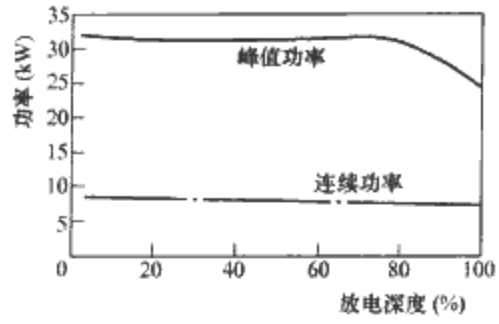


图 6.11-6　钠/氯化镍单体电池的功率能力（峰值与连续）与放电深度的函数关系

4.2　应用领域及典型应用范例

4.2.1　应用领域

1. 贮能电源领域

由于 β''-Al_2O_3 钠电池具有体积比能量高，免维护，环境温度对电池性能无影响，100%的库伦效率，潜在的成本较低（相对于其他新型电池而言）等优势，使其成为大规模储能装置的候选电池（例如 10kWh 级到 1000kWh 级的贮能装置）。

2. 动力电源领域

将 β''-Al_2O_3 钠电池作为移动式电池，特别是应用于零排放电动车曾经受到极大关注。这是因为在确定的尺寸下，β''-Al_2O_3 钠电池在质量减轻的情况下可输出更高的能量，能满足电动车辆的能量需求。

3. 航天器贮能电源领域

作为空间贮能电源，β''-Al_2O_3 钠电池可以质量更轻，成本更低（相对于现有的镍/氢电池体系），并且寿命较长，使得其在新型卫星上应用切实可行。但目前在新型卫星上应用的电源已转向了锂离子电池。

然而从技术角度看，要求有一个额外的热管理系统却极大限制了 β''-Al_2O_3 钠电池的应用。热系统对电池的影响是非常明显的，例如对电池的尺寸，质量以及整个电池的效率等。总的来说，一个有效的热管理系统应该具备：

1）具有低的热导率的隔热外套维持电池的适宜工作温度。

2）具有可以在电池长时间待用时给电池补充热量的加热器。

3）具有在某些高功率应用情况下，可以排放电池热量的冷却器。

显然能够选用 β''-Al_2O_3 钠电池应该有两个前提，首先是要用它的高能量转换效率和长工作寿命特性，其次是使用场合对热管理要求应尽可能低，如：

1）操作（充电—放电循环）相对比较频繁，例如用于每天的调峰或进行负荷调整等。

2）能量需求相对较大（大于 5kWh）。

3）电池很少冷却到允许反应物凝固的室温（仅对钠/硫电池适用）。

鉴于以上分析，β''-Al_2O_3 钠电池在以下几个方面的应用已受到关注，即用于可再生能源贮能系统；用户终端电源系统的调峰和变电站电力配送等。事实上，UPS 市场也已经为钠电池创造了进入的机会，例如为保护用电设备（如商业上的自动数据处理系统和工业上的自动加工制造系统）。现

在为了满足这种需求，特别考查了在 8h 的放电周期内每 1h 加一个持续 30s 以上的脉冲的功率测试图，结果显示钠硫电池可以提供其额定功率 500%的脉冲功率。

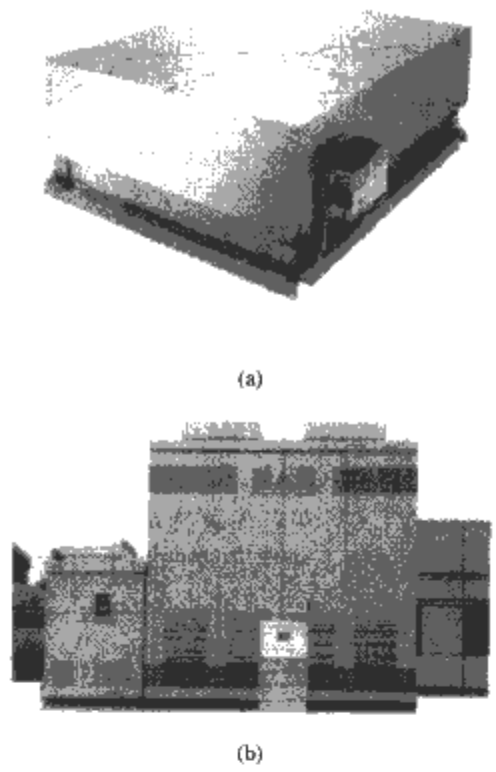
4.2.2 应用范例

许多固定用电领域都是钠/硫电池非常有前途的用户，主要是因为钠/硫电池只需要相对较小的占地面积（因为高体积比能量），常规工作时，它有很高的充放电效率，灵活的热控制，免维护，循环寿命长等。现在所有的研发者在他们的电池系统中几乎都采用了相似的设计结构，这包括采用独立的模块，每个模块的功率能力为 10～50kW 不等，能量为 50～400kWh。也就是说，一个独立的组合电池模块由一个隔热外套和其中的各种方式串、并联的单体电池构成。同这种装配结构类似的就是电动车电池。然后把这些相互独立的电池模块通过串并联的连接就可以制成满足输出电压，能量和功率要求的电池了。把这样的电池与能量转换系统（PCS）连接，就形成一个可以与电力系统连接的完整装置。表 6.11-2 给出了适应不同应用的固定型电池模块的基本性能要求。图 6.11-7 显示出一个实用化 50kW 的电池模块以及用电池模块构建的组合贮能装置。

表 6.11-2 固定用电池模块的组成与性能要求

电池模块输出功率	12.5kW	25kW	50kW	25kW	12.5kW
基本应用	电网调峰等	电网调峰等	电网调峰等	电网调峰等	再生能源系统
模块中单体电池数	336	480	384	320	216
容量(Ah)	2280	2272	3624	1408	290
能量(kWh)	105	211	421	100	100
模块中单体电池连接方式	(6 串×14 并)×4 串	(6 串×10 并)×8 串	(8 串×6 并)×8 串	(4 串×8 并)×10 串	72 串×3 并
电压(V)	48	96	128	80	144
模块宽度(mm)	996	1435	2200	710	1800
模块长度(mm)	1853	1940	1762	1371	1800
模块高度(mm)	510	520	640	1117	800
电池质量(kg)	1400	2000	3620	1700	1900
重量比能量(Wh/kg)	75	105	116	59	53
体积比能量(Wh/L)	112	145	170	92	40

虽然早在 20 世纪 90 年代中期以前，国际上一些公司就终止了它们的电动车用电池项目，但他们的研究都达到了很高的水平。他们研制的电动车用电池都已满足了当时对电池的基本性能要求，表 6.11-3 给出了两种电池的技术要求和检测结果，这些电池都曾经历了相当复杂的汽车测试。其中包括专为电池研制的 BMW E-1 电动轿车，克莱斯勒 T115 小型货车，戴姆勒奔驰 190，两款大众汽车，以及福特



(a)

(b)

图 6.11-7 贮能用电池

(a) 50kW 的电池模块；(1760mm 宽×640mm 高×2200mm 长)；(b) 用 10 个电池模块实现的 500kW/4MWh 的组合贮能电源装置

Ecostar 系列概念车等。

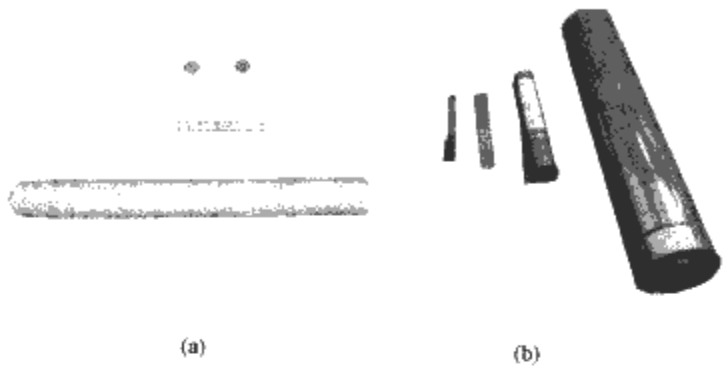
表 6.11-3 β''-Al_2O_3 钠电动车电池的性能要求

电池名称	B17	HP	Z5C
电化学体系	Na/S	Na/S	$Na/NiCl_2$
单体电池类型	A08	PB	ML3
能量(kWh)	19.2	27.7	17.8
单体电池数	240	1408	216
单体电池连接方法	48 串×5 并	(4～5 串×16 并)×20 串	216 串×1 并和 108 串×2 并
电压(V)	96	176	557 和 278
电池长度(mm)	730	728	755
电池宽度(mm)	540	695	533
电池高度(mm)	315	365	300
电池质量(kg)	175	250	189
重量比能量(Wh/kg)	118	117	94
体积比能量(Wh/L)	155	171	147
比功率①(W/kg)	215	240	170

① 计算时，电压为开路电压的 2/3，放电深度至 80%。

国内钠硫电池的研究始于 20 世纪 60 年代末，在初期其发展几乎与国外先进水平同步，研究单位也很多，在随后的 20 余年中，国内钠硫电池的研究仅局限于电动车动力用蓄电池。自 80 年代起，上海硅酸盐所成为国内唯一的钠硫电池的研制机构，我国“七五”、“八五”期间钠硫电池的研制曾列为“863 科技攻关”以及中国科学院重点项目。“十五”后期继续在电解质陶瓷管的制备技术方面开展了大量的研究工作，并先后研制了 30～100Ah 容量的动力钠硫电池，并组装了各种功率规格的电池组，用于演示驱动各种电动车辆，包括面包车、电动三轮车、摩托车等。单体电池的寿命超过了 1000 次，6kW 电池组驱动的面包车累计试验里程超过 2000km。与此同时，上海硅酸盐所已可制备各种规格的

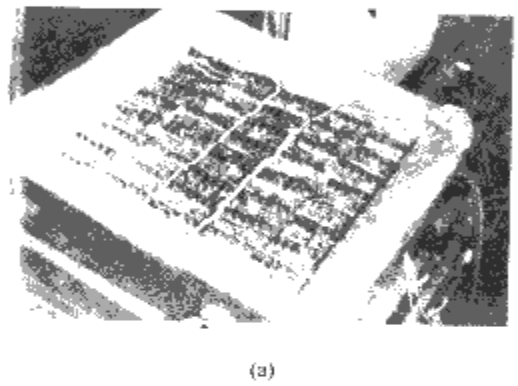
β-氧化铝电解质陶瓷管，其直径范围为 8～65mm，长度 5～600mm，抗折强度大于 240MPa，相对密度大于理论密度的 99%。可以用于各种规格钠硫电池的制备。2005 年起，开始研制贮能钠硫电池，其容量设计超过 650Ah，具有良好的安全性能。目前贮能钠硫电池已列入了我国“十一五”科技发展计划，确认为国家、地方电力部门的重点发展方向。图 6.11-8 和图 6.11-9 分别表示出我国目前开发的 β-氧化铝电解质陶瓷管、单体钠硫电池与电池组及其装配演示运行的电动中巴车。



(a)　(b)

图 6.11-8　我国开发的 β-氧化铝电解质陶瓷管与钠硫单体电池

(a) β-氧化铝电解质陶瓷管；(b) 钠硫单体电池



(a)



(b)

图 6.11-9　国产钠硫电池组及其装配的电动中巴车

(a) 电池组；(b) 装配该电池组的电动中巴车

5　使用注意事项

5.1　电池的串并联

这种电池组合成电池组时可以有多种选择，包括串联、并联和串并联模式。但必须注意到如果选择使用串联模式，失效后的单体电池必须显示低的内阻，才能保证电池组继续正常输出工作电流。否则，单个电池失效，会导致电池组不能正常工作。对于这种情况的可能出现，必须要考虑给每个单体电池并联短路装置，即一旦单体电池失效，立刻触发短路装置就被然后允许电流通过。但并联的短路装置要具有很高的可靠性，否则会使单体电池发生早期短路。

(1) 全并联连接。如果选择使用全并联连接，则每一个失效单体电池的内阻必须很大以阻止跟其并联的其余单体电池继续放电。然而让失效单体电池的内阻必须很大的情况在现实中几乎难以见到，因此必须给每一个单体电池串连一个专用触发装置，一旦单体电池发生失效，专用触发装置就会使失效单体电池处于开路状态。在专用触发装置被触发工作之前，它的电阻值必须很小才行。到目前为止还没有成功的开发出这样的专用触发装置。

(2) 电池串并联阵列。在电池串并联阵列中，频繁地在电池串中间隔的进行并联连接，这种电池串并联阵列是前面两种连接方式的一个折中的连接选择，并且这种连接方式不需要单独的、可靠性要求很高的专用触发装置。例如，SPL 公司用有 4 个或 5 个单体电池的电池串进行并联连接。一旦一个单体电池失效，与这个失效单体电池在一个串上的其他单体电池就会被与这个电池串并联的其他电池串充电。在有失效单体电池的电池串中，再充电时这些单体电池的内阻就会变得很高，会阻碍电流进一步通过这个电池串。事实上，在这个电池串上的其他未失效的单体电池就起了专用开路装置的作用。这种连接结构的主要缺点在于一旦某个电池串中的一个单体电池失效，则这个失效单体电池所在的电池串将不再为整个电池的能量输出作贡献了。此外，如果在电池串中使用了大容量的单体电池，则电池中并联的电池串的数目就少，这就会使得整个电池对于单体电池的失效变得极为脆弱敏感。

(3) 工业实践。ABB 和 SPL 公司在组合电池中以类似的方法，在电池组中将单体电池连接成网络。例如，ABB 公司的 B11 电池（1985 年生产的）有 6 个并联的电池串，在电池串中每 5 个单体电池相互交叉连接。这种连接结构类基本上似于 SPL 公司使用的连接方法。同 SPL 公司额定容量为 10Ah 的电池相比，ABB 公司电池的额定容量为 40Ah，因此 ABB 公司电池并联的数目至少是 SPL 公司并联电池数的 4 倍。ABB 公司在这种电网络连接中使用了单体电池失效装置（即短路装置），以把单体电池的失效对电池组性能的影响降低到最小程度。

5.2　热控制管理系统

大规模贮能装置用电池，包括锂基和镍基电池，都会需要某种形式的热管理系统。这在高温 β-Al_2O_3 钠电池的要求方面尤为明显。由于空间和成本的限制，电动车电池对电池内部保温与热控制机构要求特别高。这个机构通常被叫做热管理系统（TMS）。在电池正常工作温度下和不工作期间，热管理系统都必须把电池的热损失降到最小程度，以保证电池技术上的高效率，并且该系统能在电池高功率放电时使电池的温度不至于超过可接受的最高温度，或者控制电池内部不至于产生不可接受的温度梯度。为满足这些技术要求，钠/硫电池的热管理系统通常包括下列零部件及方法：

(1) 隔热外套。

(2) 主动或被动冷却系统。

(3) 在电池隔热外套内分布热量的方法。

(4) 加热电池到工作温度的加热器，如果必要的话，它在电池不工作时能使电池维持在正常的工作温度。

隔热外套所使用的保温材料（传统隔热材料，真空隔热材料，热导率可变的隔热材料）的数量和种类取决于电池的用途。还必须考虑到电池的尺寸，电池的功率一能量比，电池的循环寿命，以及电池“不工作”期间的时间长短。例如，贮能装置用电池就不象电动车电池那样受质量和体积的限制。因此，这些贮能装置用电池就可以考虑使用传统的隔热材料。

电动车电池采用了抽真空的隔热材料，以最大限度地降低隔热层的厚度及电池的质量。ABB 和 SPL 公司都使用了双层壳壁、内部充填纤维板或微孔隔热材料的真空隔热外套。化学消气剂被放置在隔热外套内以维持要求的真空度。这种真空隔热材料体系是唯一通过鉴定，不仅能最大程度地降低热损失并且能满足电池要求的力学性能的隔热设计。

配置冷却系统的必要性取决于高倍率放电过程中所产生的热量的大小，电池的热容大小以及电池的使用上限温度等。已经使用的或者设想过的冷却技术包括：直接或者间接地和空气进行热交换，间接地用液体热交换，热管输送，热分流，潜热贮存，蒸发冷却，采用热导率可变的隔热系统等。ABB 公司在其家用电动车电池上使用了主动冷却系统。电池被固定在一个平的片状的液体热交换器上，热交换器会把多余的热量带到油/空气或者油/水散热片上。如果电池的内阻或者电池间的连接电阻足够小，电池放电产生的热量会被电池本身的热容吸收掉。这种设想是 SPL 公司期望获得的，尽管在他们后来设计的产品中也使用了主动式冷却系统。

5.3 电池安全性

在正常以及意外条件下确保单体电池和电池组安全的设计都集中于防止短路和最大限度地减少任何反应物质的暴露和相互反应。有关于涉及汽车使用的意外事故，汽车产业界以及不同的政府机构都强制性地做出了要求：电池的存在不能增加使用汽车的危险性（严重性和后果）。关于各种钠/硫单体电池和电池组的设计，建议要考虑的特殊安全因素包括：

（1）选择合适的结构材料（例如低活性，高熔点的材料）。

（2）限制金属钠流向电解质或密封失效位置的可能性，以此来避免单体电池发生较大的热漂移（>100℃），热漂移可以引起单体电池的破坏。

（3）使用专用零部件把失效单体电池对相邻单体电池的影响降低到最小程度（例如在固定用电池的单体电池间填充多孔物或者沙子等填充物）。

（4）使用热熔断丝和电熔断丝以消除潜在的灾难性的短路事故。

（5）提供对环境的保护装置，例如在钠/硫电池技术中，隔热外套对防止这方面的威胁是非常有效的。

（6）电池功能冗余设计，确保在发生不可预见或未预料到的现象时，不产生不希望的结果。

第 12 章　其他新型电化学贮能装置和器件

1　电化学电容器

电化学电容器（Electrochemical Capacitor）一般称为超级电容器（Super Capacitor 或 Ultracapacitor），它是利用电极/电解质交界面上的双电层或在电极界面上发生快速、可逆的氧化还原反应来贮存能量的一类新型贮能和能量转换器件或装置。和一般电容器相比，它显著地提高了比能量（可达 10Wh/kg，甚至更高）；和蓄电池相比，虽然其比能量较低，但能以超大电流脉冲放电，输出更高的比功率。表 6.12-1 对普通电容器、蓄电池和超级电容器的特性做了比较。

表 6.12-1　普通电容器、蓄电池和超级电容器的特性比较

项　目	普通电容器	超级电容器	电　池
额定放电时间	10^{-6}～10^{-3}s	1～30s	0.3～3hrs
额定充电时间	10^{-6}～10^{-3}s	1～30s	1～5hrs
比能量（Wh/kg）	＜0.1	1～10	20～180
功率密度（W/kg）	＞10 000	1000～2000	50～300
充放电效率	＞0.9	0.90～0.95	0.7～0.85
循环寿命	几乎无限	＞100 000	500～2000

显然，超级电容器除可输出高比功率外，由于在充放电过程中只有离子和电荷的传递，没有电池中化学反应引起的相变等影响，几乎没有衰减容量，所以超级电容器具有优异的循环寿命（可达 10^5 次），或者相当或超过 5 年以上的使用时间。

和充电速度快（1～30s）、安全性好和工作温度范围宽（－40℃～70℃）等优点。由此看出超级电容器的出现，填补了普通电解电容器和蓄电池间的空档。

目前超级电化学电容器已开始在混合动力车和纯电动车以及诸多军事应用中用作辅助动力或脉冲电源，由此极大地推动了该项技术的进一步发展，并展现出良好的应用前景。

1.1　电化学电容器的原理、分类与发展简史

按照工作原理分类，电化学电容器目前已有三种体系：

（1）双层电容器（Double Layer Capacitor）。由高表面碳电极在水溶液电解质（如硫酸等）或有机电解质溶液中形成的双电层电容，如图 6.12-1 所示。该图还表示出一个典型双电层的形成原理，显然双电层是在电极材料（包括其空隙中）与电解质交界面两侧形成的，双电层电容量的大小取决于双电层上分离电荷的数量，因此电极材料和电解质对电容量的影响最大。一般都采用多孔高表面积碳作为双层电容器电极材料，其比表面积可达 1000～3000m^2/g，比电容可达 280F/g。

（2）赝电容器（Pseudo-Capacitor）。由电极表面上或者体相中的二维或准二维空间上发生活性材料的欠电位沉积，形成高度可逆的化学吸附/脱附或氧化/还原反应产生和电极充电电位有关的电容，又称法拉第准电容；典型的赝电容器

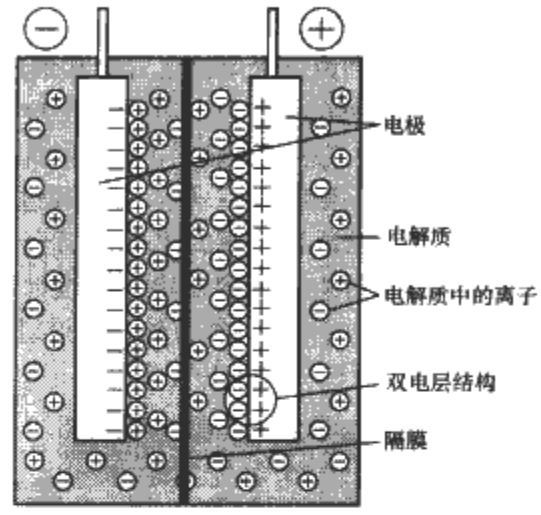


图 6.12-1　碳/碳双电层电容器的构成及双电层形成原理示意图

是由金属氧化物，如氧化钌构成的，其比电容高达 760F/g。但由于氧化钌太贵，由此已开始采用氧化钴、氧化镍和二氧化锰来取代。

（3）由半个形成双层电容的碳电极与半个导电聚合物或其他无机化合物的表面反应或电极嵌入反应电极等构成的混合电容器（Hybrid Capacitor）。目前在水溶液电解质体系中，已有碳/氧化镍混合电容器产品。同时正在发展有机电解质体系的碳/碳（锂离子嵌入反应碳材料）、碳/二氧化锰等混合电容器。

此外，若按照电容器采用的电极材料分类，则可分为碳基型、氧化物型和导电聚合物型；而按采用的电解质类型分类，则又分为水溶液电解质型和非水电解质型（主要为有机电解质型）。在有机电解质溶液中，电容器的工作电压可提高至 2.5V 以上。

电化学电容器的发展史是源自于电极与溶液间电化学界面的双电层概念的提出及其电容性质的揭示（1879 年就由 Helmholz 发现）。但直到 1957 年，才由 Beker 首先提出了利用双层电容原理制作成小型电化学电容器，成为了一种新型贮能器件。接着于 1962 年由标准石油公司生产出一种以碳作为电极材料的 6V 超级电容器，用作小船的动力电源，使其在湖面上行驶了 10min。该技术随即转让给日本 NEC 公司，并由该公司于 1979 年开始生产采用水溶液电解质的超级电容器，用于汽车的起动系统，开创了电化学电容器的正式规模生产与商业应用。几乎同时，松下公司开始设计以活性碳为电极材料、有机溶液为电解质的电化学电容器“Gold Capacitor”，并将其推向应用。此外 1990 年 Giner 公司推出了贵金属氧化物为电极材料的赝电容器。由此，电化学电容器的特性越来越引起人们的广泛兴趣和关注，并使超级电容器（Ultracapacitor or Supercapacitor）一词很快得到认可和广泛采用。

在以上基础上，电化学电容器进入了全面发展时期，自 20 世纪 90 年代以来许多大公司和著名的研究机构都不断取得令人注目的成就，并且开始尝试更广阔的应用领域。在该

领域中的技术进展主要表现为随着新体系（如混合型电容器）、新材料（如聚合物导电材料和高性能碳材料等）的研究、发现与应用，使超级电容器的比功率和比能量都在显著提高之中。

1.2 电化学电容器的结构和基本组成以及组合形式

电化学电容器和蓄电池外观完全一样，如图 6.12-2 所示。图 6.12-2（a）显示出两个典型的圆柱形超级电容器，其内部采用与电池一样的卷绕式结构；（b）是图 6.12-2 典型的单体电容器（a）和由方形单体电容器构成的 45V 组合电容器（b）方形电容器的组合体，其中方形单体电容器也采用与电池一样的叠片式结构。显然，作为贮能与能量转换产品，电化学电容器也像蓄电池一样，必须通过串并联形成具有一定输出电压、能量和功率的组件或组合系统，如图 6.12-2（b）所示。进行组合电容器串并联设计时，一般可采用与普通电容器完全相同的计算方法，求得组件或组合系统的电阻、电压、能量和功率等电气参数。



(a)



(b)

图 6.12-2 典型的超级电容器单体和组件照片

（a）典型的单体电容器；（b）45V 电容器组件

超级电容器单体内部的组成也与电池相同，即主要由两个电极（正极与负极）、电解质和隔膜等组成。对超级电容器中使用的关键材料包括电极材料、电解质材料和隔膜材料，分别简述如下：

（1）电极材料。超级电容器使用的电极材料主要有碳材料、金属氧化物材料和导电聚合物材料。鉴于双层电容器和混合型电容器中都离不开碳电极，因此对碳材料的研究与应用最多、最深入和最广泛。目前可以用于超级电容器的碳材料包括粉体活性炭、活性炭纤维、碳黑、碳凝胶、碳纳米管、玻璃碳、网络结构碳以及某些有机物热解的碳产品等。由于双电层电容正比于电极/电解质交接面面积，故要求选择具有高的真实表面积的碳[如达到(2000～3000)m^2/g]。一般测试出的碳表面积中，有很大一部分来自碳的微孔部分，由于这些微孔的孔径太小，以致电解质不能进入孔中，也就不能对电容量有所贡献。因此，期望选择的碳具有适度的孔尺度，在水溶液电解质中应用时，由于离子较小，选择的碳孔径为 0.5～1.0nm；在有机电解质应用时，由于离子较大，故选择碳孔径为 1.5～2.0nm。事实上，单位面积的双电层电容还与碳的表面结构和表面功能团等有关，这也印证了碳选择的多样性。此外也要求碳具有高导电性和高电化学稳定性。

（2）电解质材料。超级电容器使用的电解质主要有水溶液电解质（如 H_2SO_4、KOH、KCl 和 $(NH_4)_2SO_4$ 体系等）和有机电解质体系（如 Et_4NBF_4/碳酸丙烯酯、Et_4NBF_4/乙腈等）。水溶液电解质电导率比有机电解质高 2 个数量级，故适用于大电流放电型超级电容器；但水溶液工作电压远低于有机电解质体系，故采用有机电解质体系利于获得高比能量。此外固体聚合物电解质也在得到研究，由于电导率非常低，仅适合用于全固态小型化电容器的开发。

（3）隔膜材料。如同在电池中的功能和要求，超级电容器使用的隔膜基本上都是电池采用的隔膜，如聚丙烯隔膜、聚乙烯微孔膜、玻璃纤维膜、非编织尼龙膜、无纺布等。

1.3 电化学电容器的特性

鉴于超级电容器也是一种典型的贮能和能量转换装置，因此用于表达蓄电池的特性参数大多数都适用于对超级电容器的性能表征，但唯电容量的表征不同。超级电容器的电容量表达式与普通电容器的是相一致的，即

$$C = Q/V$$

式中：C 为电容量，F；Q 为电容器储蓄的电量，C；V 为电容器两端的电压。

超级电容器的电压取决于所采用的电解质类型，一般水溶液为 2V 以下，而有机电解质体系为 2.5～3.5V。由此也可以推倒出电容器储存能量表达式如下

$$E = (1/2)CV^2$$

能量 E 的单位可用 J（焦耳）表示。

作为贮能和可以提供高功率脉冲的能量转换装置，超级电容器的最重要性能参数是在特定比功率输出条件下的有用比能量（Wh/kg 相对于 W/kg）和在充放电效率为 95%[V_p/V（理想值）]条件下的输出比功率（W/kg）；在全放电条件下的循环寿命（循环次数）和充电条件下的自放电(%)。事实上电容器的串并联电阻对于其输出能量、输出功率以及充放电效率有着重要影响，因此电容器本身的电阻、组件或组合系统的串并联电阻也是一个重要参数；此外还有环境温度变化下的电容器参数，如电容量和电阻（特别是低温下）以及自放电和寿命（特别在高温下）的依赖关系等。

由于双电层电容器在充放电过程中，电极上不发生电化学反应，只进行离子和电荷的转移。因此上述电极过程常称为理想极化过程，其恒电流条件下的充放电曲线呈现典型的对称锯齿波形状，如图 6.12-3 所示。放电起始有一段电压急剧下降，表征了电容器内阻上的电压降，由此可计算出电容器内阻。对于一个好的电容器而言，内阻低是一个重要标志。要降低内阻必须选择高导电性电极活性材料和集流体材

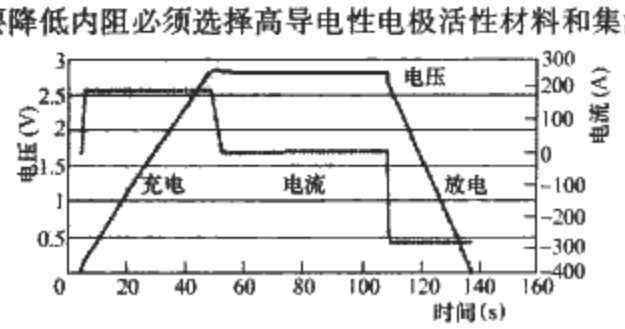


图 6.12-3 3000F 碳/碳型超级电容器（有机电解质溶液体系）的典型充放电曲线

料、低电阻隔膜材料和高导电电解质材料，同时要有合适的工艺保证电极活性材料与集流体的低电阻接触等。

与其相比，混合型电化学电容器的充放电曲线显示略为不同的特征，如图 6.12-4 所示。可以看出，放电时电压下降较平缓，表示出金属氧化物电极部分理想非极化特征的叠加作用。

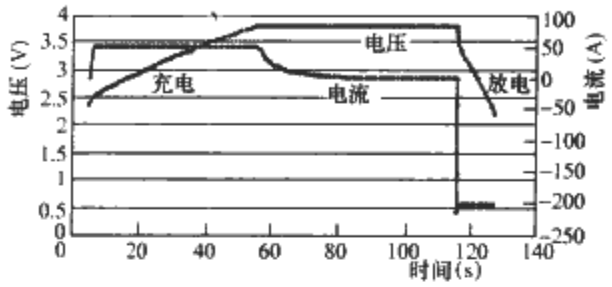


图 6.12-4　1800F 碳/金属氧化物混合型超级电容器（有机电解质溶液）的典型充放电曲线

实际上，超级电容器在放电时的输出功率和可利用能量都与电池设计和采用的工作电压区间有关，如图 6.12-5 (a) 和 (b) 所示。它们分别表示出两种设计的 C/NiO 碱性水溶液电解质混合电容器的比能量与比功率的关系以及与所取电压区间对其影响。显然，脉冲型电容器显示高的比功率和低的比能量，但比能量随比功率增高的下降较缓慢，这是因为电极设计的较薄，比容量低，但放电利用率较高，且随放电电流增高变化较小。相反，牵引型电容器采用厚电极，比能量增，但比功率下降，对功率增加特别敏感。两种情况下，电压区间的选择都有显著影响。表 6.12-2 总结了当前几种超级电容所达到的性能水平，并用于进行相互比较。

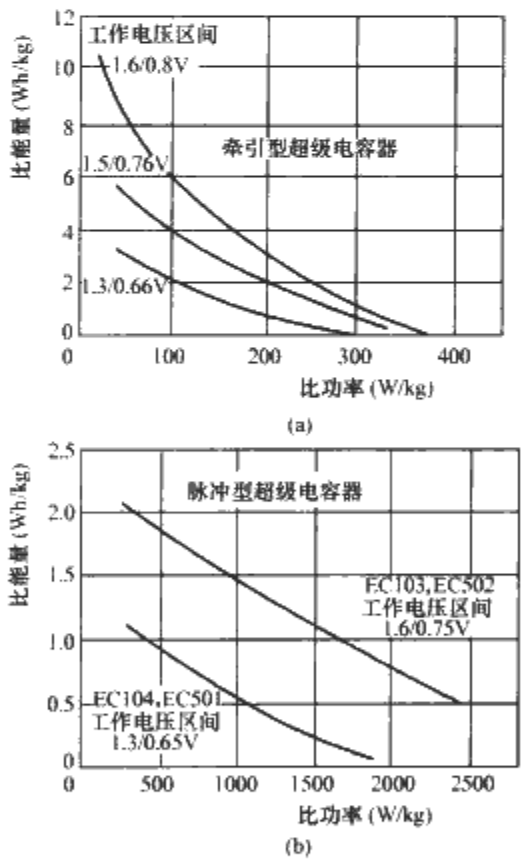


图 6.12-5　混合超级电容器的输出比能量与输出比功率的关系以及所取电压区间的影响
(a) 牵引型超级电容器；(b) 脉冲型超级电容器

表 6.12-2　几种超级电容器产品的性能水平比较

超级电容器类型	电压 (V)	电容 (F)	电阻 (mΩ)	比能量 (Wh/kg)	比功率 (95%，W/kg)	质量 (kg)	体积 (L)
C/C	2.7	2800	0.48	4.45	900	0.475	0.320
C/C	2.7	10	25.0	2.5	3040	0.002 5	0.001 5
C/C	2.7	1800	0.55	3.6	975	0.38	0.277

续表

超级电容器类型	电压 (V)	电容 (F)	电阻 (mΩ)	比能量 (Wh/kg)	比功率 (95%，W/kg)	质量 (kg)	体积 (L)
C/C	2.7	3640	0.30	4.2	928	0.65	0.514
C/C	2.7	5085	0.24	4.3	958	0.89	0.712
C/C (PC 溶剂)	2.7	1375	2.5	4.9	390	0.210	0.151
C/C (PC 溶剂)	2.5	1200	1.0	2.3	514	0.34	0.245
C/C (PC 溶剂)	2.5	1791	0.30	3.44	1890	0.310	0.245
C/C (PC 溶剂)	2.5	2500	0.43	3.70	1035	0.395	0.328
C/C	2.7	3400	0.45	4.3	760	0.60	0.48
C/C	2.8	3200	0.25	3.7	1400	0.63	0.47
C/C (PC 溶剂)	2.7	1350	1.5	4.9	650	0.21	0.151
新型 C/C (PC 溶剂)	3.3	1800	3.0	8.0	825	0.21	0.15
C/NiO/水溶液	1.3	10 000	0.275	1.1	156	1.1	0.547
C/金属氧化物	3.8	1800	1.5	9.2	1025	0.232	0.143

注　比能量测试条件——以 400W/kg 恒功率放电自 V_0 至 $V_{1/2}$。
比功率计算方法——$P=9/16(1-EF)XV^2/R$，其中 $EF=95\%$，充放电效率。
除表中已有注明，其他体系皆采用乙腈为电解质的溶剂。

从表 6.12-2 可以看出，最大容量的超级电容器为 10 000F；最高比能量的体系为新型碳材料/有机电解质双电层电容器和混合电容器体系，由于它们的工作电压提高至 3V 以上，使比能量接近了 10Wh/kg；而超级电容器的比功率在电压效率 95% 下，一般都可在 1000W/kg 左右，最高则达到 3000/kg。

超级电容器显示极长的循环寿命，如图 6.12-6 所示，在 150C 放电率下的实际测试寿命达到 2 700 000 次，而且还有进一步增长的潜力。超级电容器的自放电如图 6.12-7 所示，超级电容器的充放电循环寿命曲线性能可以用贮存期间的电压变化来表征。显然超级电容器充电后搁置初期电压下降较快，然后就趋于平稳下来。同时注意到，初始电压越高，初始电压下降越快。

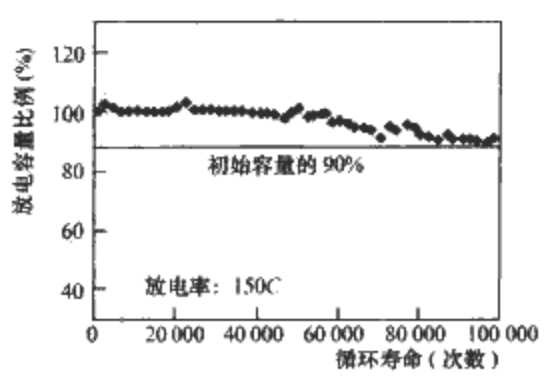


图 6.12-6　超级电容器循环寿命曲线

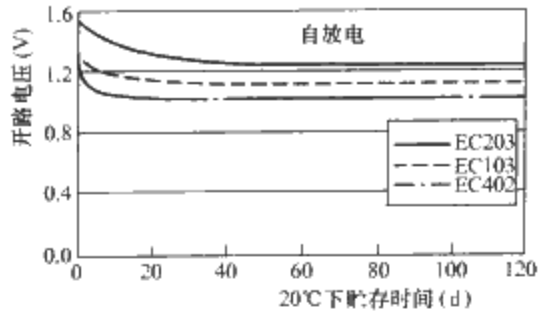


图 6.12-7 超级电容器的自放电特征曲线

1.4 电化学电容器的应用与发展前景

超级电容器已经进入边研究与开发、边商业应用阶段。其中大量小型超级电容器已经广泛应用于各种电机和电器的辅助或备用电源。而大型超级电容器则已成功的应用在车辆启动，工厂叉车动力电源和 UPS 电源。特别是近年来开发出采用天然气发动机和超级电容作为混合动力混合电动公共汽车。其上应用的超级电容器比能量达 6Wh/kg，比功率 680W/kg。汽车行驶 60 万 km 后，电容器充放电效率仍大于 90%。表 6.12-3 是混合动力车使用的一种超级电容器的主要性能。

同时，在俄罗斯还采用超级电器作为电动力的纯电动车，作为短距离固定行驶路线上的公共交通车(如大型展览馆间的短距离载人车辆)，由于其充电快速，可以保证这种使命的执行。

特别值得注意的是国内超级电容器的研究、生产和应用虽处于起步阶段，但发展也十分迅速。其中防化研究院、清华大学、北京大学等许多研究单位都对超级电容中应用的各种碳材料、金属氧化物材料等电极材料进行了深入研究；上海、锦州和大庆等地已经建成了超级电容器生产条件。上海已经用自主开发的 C/NiO 混合电容器作动力，成功演示了一条短距离纯电动车公交线路。

表 6.12-3 混合动力车用超级电容器的典型性能

参数名称	性 能 数 据
电容量(F)	2700(−10%/+30%)
直流电阻(mΩ)	1.0(25℃)(−25%/+25%)
交流电阻(mΩ，1kHz)	0.55(−25%/+25%)
电 压(V)	连续放电为 2.5
	脉冲放电为 2.7
放电电流(A)	625
参考尺寸(mm)	161×61.5×61.5
重 量(g)	725
体 积(L)	0.6
温 度(℃)	操作−40～+70 贮存−40～+85
漏电电流(mA，72h)	6

超级电容器作为一种贮能装置虽然还处于初始发展阶段，但由于显示了广泛的应用前景，受到世界各国的高度关注，由此推动超级电容器技术领域的持续进步和扩展应用。技术发展将集中于：

(1) 高比电容的材料的研究和制备。

(2) 提高超级电容器的比能量和比功率特性。

(3) 组合超级电容的的设计与优化。

(4) 在电动车辆等应用对象上的实际运行评估。

(5) 不断通过技术进步(包括低成本材料技术等)大幅度降低成本。

2 液体流动氧化还原贮能电池

液体流动氧化还原贮能电池系采用溶解于电解质溶液中的一对高价与低价离子电对(Redox)在流动中进行氧化还原产生能量储存和转换的体系，如 Fe^{+3}/Fe^{+2} 与 Cr^{+2}/Cr^{+3}；VO_2^+/VO^{2+} 与 V^{+2}/V^{+3} 等典型氧化还原电对体系。从理论上分析可知这种体系的反应过程只发生离子价态的相互转化，故反应十分简单，因此可以具有极长循环寿命的特点，特别适合作为贮能电池使用。近来随着太阳能和风能等再生能源的利用和扩大应用，低成本、高性能、长寿命贮能电池的发展十分迫切，从而极大地推动了液体流动氧化还原贮能电池技术的发展。其中钒电池贮能体系受到更多青睐，并已开始获得了实用化进展，故作为液体流动氧化还原贮能电池的典型体系予以介绍。

2.1 液体流动全钒氧化还原贮能电池的基本原理与发展简史

液体流动全钒氧化还原贮能电池是采用不同价态的钒离子溶液分别作为正负极活性物质，通过液体泵将它们从各自的储槽中输送到电池堆内的正负电极上进行电化学氧化还原反应，一面在外电路形成电子流，另一方面溶液又回到各自的储槽内。由此实现液态活性物质的不断流动循环，其电池反应如下式所示

正极 $VO_2^+ + 2H^+ + e = VO^{2+} + H_2O$

$V^0 = 0.999V$(相对标准氢电极)

负极 $V^{2+} - e = V^{3+}$ $V^0 = -0.225V$(相对标准氢电极)

电池反应 $VO_2^+ + 2H^+ + V^{2+} = VO^{2+} + H_2O + V^{3+}$

式中：V^0 为氧化还原电对相对标准氢电极的电位。

由上式可知电池的电动势为 1.254V。该值是在正负极活性物质的浓度为 1mol/L 下得到的，当浓度增加时，电动势将进一步提高，使用价值更高，例如当浓度足够高时，电池电压可达 1.6V 以上。

由 V^{2+}/V^{3+} 电对和 V^{4+}/V^{5+} 电对组成的钒氧化还原电池(Vanadium Redox Battery)首先是澳大利亚新南威尔士大学(UNSW)Marria Kazacos 在 1985 年提出的，在后来的研究中发现 V^{5+} 可稳定地存在于硫酸溶液中，这一发现成为该电池实用化的基础。1998 年 UNSW 将其专利转让给工业界，从而推动了电池技术向实用化的快速转化。其中日本住友电工在 1989 年建成一座 60kW 级钒电池电站，运行了 5 年，循环周期达 819 次。此后该系统处于边进行材料和电池结构等的研究与改进，边进行发电装置设计、制作与演示评估的进程中。包括用于电极载体材料的特种石墨和碳纤维，优化电池结构与溶液制备，离子交换膜交联技术的应用等，使钒电池作为贮能电源逐步走向了商业化。

目前住友电工的 25kW 实验室钒电池电堆已运行了 16 000 次循环，历经 8 年尚能使用。其中仅发现隔膜寿命不足，其他组件(包括电解质)都可循环使用。显然，这一体系比其他电化学贮能体系具有很大的成本优势。

2.2 液体流动全钒氧化还原贮能电池的基本结构与组成

典型的钒电池体系的基本结构和组成如图 6.12-8 所示。可以看出该电池体系与燃料电池、特别是甲醇直接燃料电池体系十分相似，电池反应所需的正负极活性物质都是从电池外输入的。只是甲醇直接燃料电池只有一个甲醇贮液槽，氧化剂来自空气中的氧；而全钒氧化还原体系有两个贮液槽，分别贮有钒的 5 价(VO_2^+)/4 价(VO^{2+})与 2 价(V^{2+})/3 价

(V^{3+})的活性物质组分，并通过泵实现在电池中的连续循环与发电。

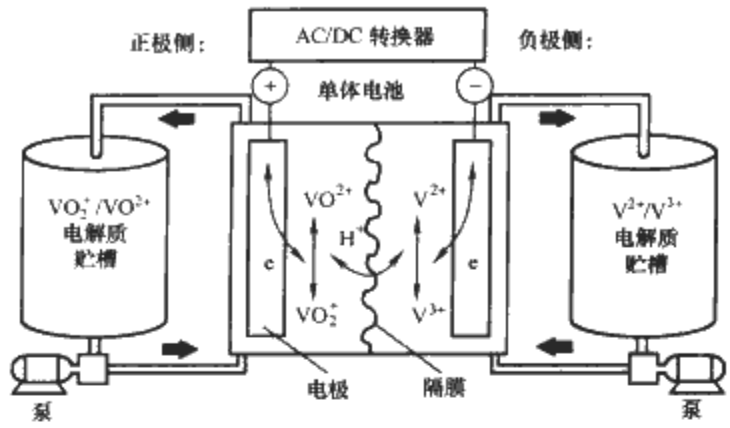


图 6.12-8　液体流动全钒氧化还原贮能电池的基本结构与组成示意图

由图 6.12-8 可知，电池的主要组成为电池本体和贮存溶解有正负极活性物质的电解质贮槽及其泵浦输送循环系统。电池本体一般采用双极性电堆结构，而每个单体电池是由正极、负极和隔膜构成。在全钒单体电池中，正、负极本身并不参加反应，都是用于产生氧化还原反应及传输电子的场所，故一般采用具有高表面积、良好导电性和在强酸性电解质体系中稳定的碳材料或导电聚合物，诸如石墨毡、特种碳纤维等(H^+和水自由穿透，传输离子)单独或与聚合物复合制成；隔膜是该电池中的关键件，它允许氢离子和水穿透，但要求尽量减少溶解在电解质中的正、负极活性物质相互渗透。目前一般采用质子交换膜(PEM)作为隔膜。电解质是载有正、负极活性物质的可流动介质，平时分别贮存在正极和负极电解质贮槽中，工作时分别由泵打入电池的正、负电极区，并进行循环。电解质是硫酸溶液，然后将合适浓度和价态的钒氧化物溶解入上述电解质中，形成了溶解有正、负极活性物质的两种电解质。

2.3　液体流动全钒氧化还原贮能电池的特点与典型性能

鉴于液体流动全钒氧化还原贮能电池的原理、结构和组成的特殊性，形成了这类电池的如下突出特点和优势。

(1) 由于该电池的活性物质是含在电解质溶液中，并随着电解质流动至电极处进行电化学氧化还原反应，由此反应过程中的浓差极化降至最低。

(2) 由于只有液体活性物质参加电极反应，故在工作过程中电极结构与组成皆不发生变化，使电池显示极长的寿命。

(3) 可以通过更换电池的活性物质来实现电池的即时充电，故响应速度极快。

(4) 电池容量只取决于外部活性溶液的浓度与数量，调整方便。

(5) 采用的含活性物质溶液又可重复使用，也不会造成对环境的污染等。

由于此类电池需要辅助的电解质贮槽、管道与泵浦等，因此特别适合大容量电池设计，并适合用作贮能电源。因此对该类电池的性能表征一般为在特定输出功率设计下，体系可输出的总能量输出(指一次装满活性物质可发电的能量)、体系的充放电转换效率(包括电流、电压和总效率)和循环寿命等。目前，该电池体系的电流效率已经达到 93.5%，电压效率达 87.7%，总效率为 82%；电池中电堆的电流密度为 100mA/cm² 时，可以输出 1.2kW/cm² 的比功率；1997 年 9 月日本在鹿岛建成的电站调峰用 200kW×4h 钒电池体系，达 650 次循环寿命。

2.4　液体流动全钒氧化还原贮能电池的产品开发与应用

自 2001 年起液体流动全钒氧化还原贮能电池进入产品开发与商业化应用阶段，表 6.12-4 列出了已建设使用的典型商用钒电池系统，图 6.12-9 则显示出其中一套 250kW×2h 的商用钒电池系统。

表 6.12-4　　几种典型的商用钒电池系统

设计功率与总能量	用途说明	建成时期
170kW×6h，DC/AC 交流输出	与风力发电联用，稳定电力输出	2001－03(＃)
1.5MW×1h，DC/AC 交流输出	电网调峰	2001－04(＃)
30kW×8h，DC 直流输出	与光伏发电联用，进行贮能	2001－04(＃)
500kW×10h，DC/AC 交流输出	电网调峰	2001－11(＃)
42kW×2h，DC/AC 交流输出	电网调峰	2000－02(＃)
100kW×8h	平衡负载	2001－04(＃)
3000kW×1.5S，1500kW×1h	UPS 平衡负载	2001－04(＃)
170kW×6h，	与风力发电联用，贮能及稳定电力输出	2001－04(＃)
30kW×8h	与光伏发电联用，进行贮能及平衡负载	2001－04(＃)
250kW×2h	电站调峰	2001－03(＊)
250kW×8h	电站贮能系统	2004－03(＊)
20kW×4h	风能、柴油机发电和钒电池联合供电	2003－11(＊)

(＃) 住友电工制造；(＊) VRB 电源公司制造。

我国从 20 世纪 80 年代末刚涉足液体流动氧化还原贮能电池体系研究，而 90 年代，中国工程物理院电子工程所则首先开展了全钒液体流动氧化还原贮能电池体系研究，接着广西大学、东北大学和大连化学物理研究所、清华大学、中南大学和北京大学等分别参与了电解质、离子交换膜和系统的研究工作。其中，中国工程物理院电子工程所曾制造出 500W 和 1000W 钒电池样机，1kW 单元电堆的电流密度为 120mA/cm² 时，电流效率可以达到 80%。最近报道，大连化学物理研究所在钒电池技术方面有了新的突破。鉴于我国攀枝花已探明的钒铁磁矿储量高达 100 亿吨，因此显示了在我国发展液体流动钒氧化还原贮能电池技术与产品的良好条件与发展前景。



图 6.12-9　运行中的一套 250kW×2h 商用钒电池系统

第 13 章 燃 料 电 池

燃料电池是不经过燃烧直接以电化学反应方式将燃料的化学能连续转化为电能的装置。

虽然早在 1839 年，格罗夫（Grove）就发明了燃料电池，但是很长时期以来由于对气体反应的催化过程缺乏认识，同时适合的催化剂和隔膜材料进展较慢，以至于直到 20 世纪 50～60 年代才取得了碱性燃料电池和磷酸型燃料电池的技术突破。70～80 年代，磷酸燃料电池和碱性石棉膜燃料电池技术得到较大发展，碱性石棉膜燃料电池在载人飞船和后来的航天飞机上得到实际应用；同时由于新型全氟型氢离子导电型聚合物膜的问世，使质子交换膜电解质燃料电池技术取得了突破性进展。同时，熔融碳酸盐燃料电池和固体电解质燃料电池技术也已受到极大重视并取得了显著发展。

一般氢和富氢燃料用作燃料电池的燃料，而纯氧或空气中的氧用作燃料电池的氧化剂。纯氢通常可取自于水和化石燃料，而氢/氧燃料电池的反应产物即是水，因此氢已被评价为既是未来世界的绿色能源，又被认为一旦实现这种能源结构，人类将进入所谓“氢经济时代”。鉴于这种考虑，已使实现低成本、高效率、长寿命制氢、储氢和利用氢直接发电的燃料电池相关的科学与技术问题，成为了当今国际科技前沿的重大基础与技术研究课题之一。

21 世纪将是燃料电池在技术和成本上取得突破，从特殊应用到商品、产业化至关重要的时期。一般都认为质子交换膜电解质燃料电池（包括氢/空气和甲醇直接氧化燃料电池）显示出在电动车辆和小型用电器具上的应用前景，而高温固体电解质燃料电池则在发展未来地面独立电站方面具有应用前景。由此在本章中将特别对质子交换膜电解质燃料电池和固体氧化物燃料电池作出较为详细的描述。

1 燃料电池的原理、构成、分类与特性

1.1 燃料电池的基本工作原理

燃料电池的基本工作原理可用图 6.13-1 加以说明。由图可以看出，与常规电池一样，反应物质（燃料，如氢气；氧化剂，如氧气）的电化学氧化与还原反应分别在正、负极与电解质的交界面上进行。电荷是通过电解质中的正、负离子迁移在电池正、负极间进行传递；而电子通过外部电路实施传输，同时输出了电能。但与常规电池不同，参加反应的燃料和氧化剂不是贮存在电池内部，而是当需要工作时，将其由外部输送至电池内的电极上，由此可以实现连续的反应和连续的电能输出。

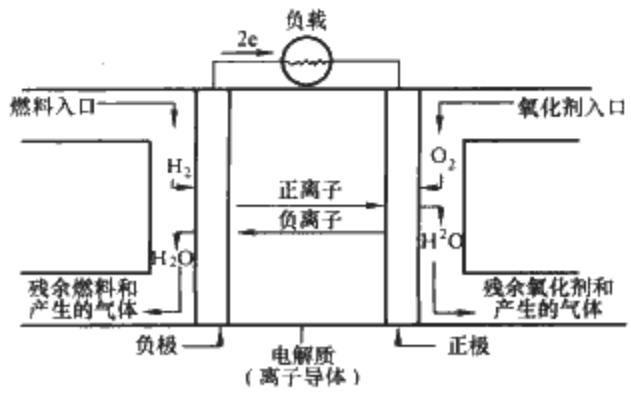


图 6.13-1 燃料电池的基本工作原理示意图

1.2 燃料电池的发电单元与体系构成

事实上实用型燃料电池的组合单元都采用类同于水激活电池的双极型电堆结构（单体电池间连接通过一片共用导电板实现，其可以是金属板或致密石墨板，但本身不透气、不漏液。该导电板既是前一个电池的正极或负极，又是后一个电池的负极或正极，由此构成直接串联的电堆），如图 6.13-2 所示。

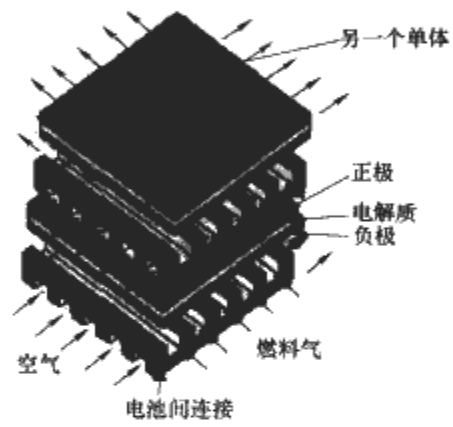


图 6.13-2 燃料电池的发电单元“电堆”示意图

燃料电池装置中的发电单元都称谓“电堆”。电堆中所选取的单体数由电堆的输出电压要求来确定。为了维持电堆工作的连续正常工作，在燃料电池装置中除了有燃料储存与供应管路子系统外，还需要调节或排除反应产物和热的辅助子系统。同时若采用烃类燃料（如天然气等），通常都需要外部重整或内部重整装置，以得到富氢燃料气。而且，实施内部工作条件（燃料和氧化剂提供压力与流量、电池工作温度与湿度、冷却剂供应状况等）的监控以及进行输出功率的稳定性调整或从直流转变为交流输出等，还特别需要一个电子控制与功率调整系统。因此燃料电池供电装置常常是一个包含诸多辅助部件的复杂系统，如燃料电池本体（电堆）、燃料重整和富氢或纯氢供应、电池产物与热量排出、以及控制与功率调整等子系统，如图 6.13-3 所示出的一个完整的燃料电池发电系统示意图。

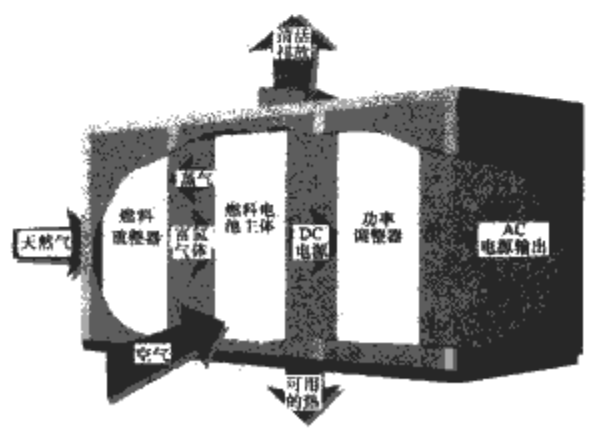


图 6.13-3 燃料电池发电系统示意图

1.3　燃料电池基本分类

燃料电池可以按照电解质不同分类，表 6.13-1 列出了主要燃料电池类型、特性与主要应用领域。

表 6.13-1　　燃料电池的分类、构成与应用

类　型	电解质	工作温度(℃)	燃料	氧化剂	应用领域
碱性燃料电池(AFC) a 自由电解液 b 石棉膜型	KOH	a ～250 b 70～90	纯 H_2	纯 O_2	载人航天
质子交换膜燃料电池 (PEMFC)	聚合物离子交膜	60～80	纯 H_2 重整 H_2	纯 O_2 或空气中氧	电动车辆、航天及军事应用等
磷酸燃料电池 (PAFC)	磷酸	200	重整 H_2	空气中氧	洁净电站
熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)	碳酸锂＋碳酸钾	600～700	煤气、天然气	空气中氧	洁净电站
固体氧化物燃料电池(SOFC)	氧化钇稳定氧化锆	600～1000	煤气、天然气	空气中氧	洁净电站

此外，还有两种正在快速发展的燃料电池，即甲醇直接燃料电池和再生式燃料电池(RFC)，目前它们都采用质子交换膜作为电解质。

1.4　燃料电池的基本特性

由热力学计算得出，氢和氧组成电对的理论电压为 1.229V，该电压值随温度升高而降低。但实际燃料电池体系的电压遵循上述规律，但其值总是低于上述理论值，如表 6.13-2 所示。

表 6.13-2　　燃料电池的理想电压与温度的关系

温度(℃)	25	80	205	650	1000
电池类型		质子交换膜	磷酸	熔融碳酸盐	固体氧化物
理想电压(V)	1.18	1.17	1.14	1.03	0.91

燃料电池中一旦流过电流，则必然发生极化现象(包括活化极化、电阻极化和浓差极化)，由此使实际电池的工作电压更低于其理想值，如图 6.13-4 所示。而且电流增大，电池工作电压就越低。一般燃料电池的工作电压范围为 0.8～0.4V。

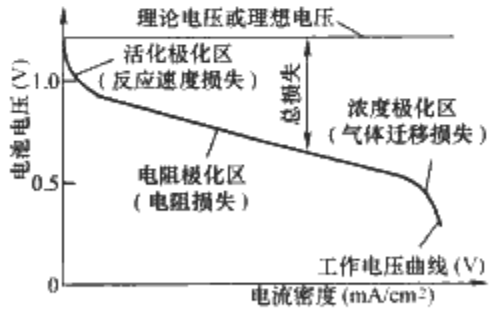


图 6.13-4　燃料电池的极化特性
(工作电压与电流密度的关系)

燃料电池是通过电化学反应将燃料的化学能转化为电能，由此可以避免卡诺循环的限制，因而可以比燃料直接燃烧得到更高的效率。表 6.13-3 列出了几种燃料电池的转换效率，并与两种热机发电做了比较。由表中数据可以看出总体上燃料在燃料电池中的转换效率要高于在热机中的转换效率。其中又以固体氧化物燃料电池最为突出，在这类高温燃料电池中，不仅可以利用电能，还可利用系统的热能，获得更高的转换效率。显然燃料电池具有高的转换效率是一个重要的特性。

表 6.13-3　　燃料电池的发电效率与热机发电效率的比较

发 电 类 型	规　模	效率(%)
往复式发电机	50～6MW	33～37
大型涡轮发电机	10～300kW	20～30
磷酸燃料电池(PAFC)	50～1MW	40
固体氧化物燃料电池(SOFC)	5～3MW	45～65
质子交换膜燃料电池(PEMFC)	＜1MW	34～36

2　碱性电解质燃料电池

碱性燃料电池的工作原理可用图 6.13-5 加以说明，该图显示出一种电解质流动的碱性燃料电池工作状态。在这种流动体系中反应热可以带出，而水可以借助蒸发排出。

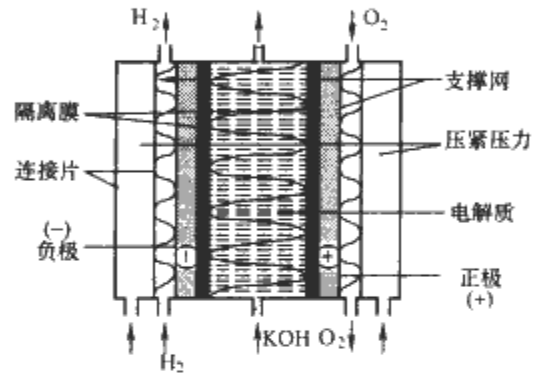


图 6.13-5　一种碱性燃料电池的工作原理图

在上述电池工作过程中的化学反应可表达为

正极上：　　$O_2+2H_2O+4e \longrightarrow 4OH^-$

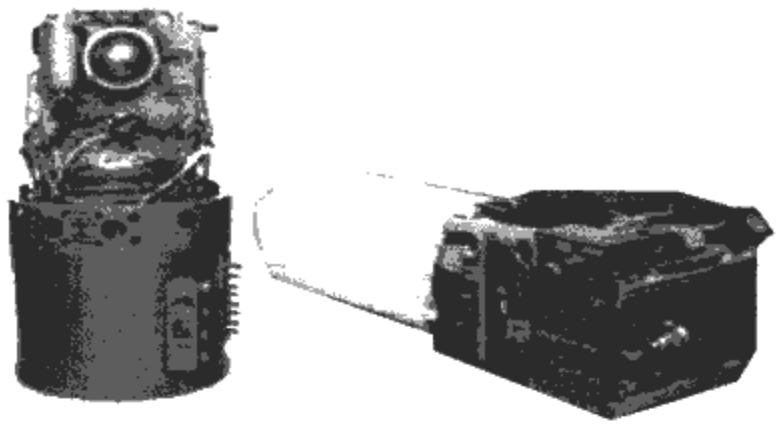
负极上：　　$H_2+2OH^- \longrightarrow 2H_2O+2e$

电池总反应为：$2H_2+O_2 \longrightarrow 2H_2O$＋电能＋热

由于 KOH 是碱性氢氧化物中导电性最高的，故是碱性燃料电池体系中最为合适的电解质材料。这种燃料电池使用的碱浓度区分为两类，其中电池中采用含 85%KOH 的高浓度碱溶液，其工作温度约为 250℃；而采用 35%～50% KOH 的稍低浓度碱溶液，则工作温度可以降低至小于 120℃。后一种情况下，电池通常采用微孔石棉膜吸收与保存电解质，故这类电池又称为碱性石棉膜燃料电池。一般电池中电极上采用的催化剂可以比较广泛，如 Ni、Ag、金属氧化物、尖金石材料和贵金属等。但是可以使用的燃料却只限定于高纯度氢，其中不允许含 CO 和 CO_2，因为 CO 可使催化剂中毒，而 CO_2 可与 KOH 反应生成 K_2CO_3，使电解质变质（特别是降低了离子的迁移率）。

AFC 系统曾经是自 1960 年其开始开发的最早实用化燃料电池，但鉴于其对 CO_2 的极其敏感性等，因此它首先是应用于美国早年的阿波罗飞船（Apollo Space Vehicle），而一直没有发展成地面使用的电源系统。

在阿波罗飞船上应用的 AFC 是圆柱型设计，如图 6.13-6（a）所示。其直径为 57cm、高度为 112cm 和质量为 110kg。系统工作电压为 27～31V 时，可输出的峰值功率达 1.42kW，而在广泛区间内平均输出功率为 0.6kW。电池采用纯 H_2 和纯 O_2，电解质浓度取 85%KOH 以确保电池在较低工作压力（60lb/in²，即 0.4MPa）下，不会发生电解质沸腾。由于浓电解质电池性能不如低浓度电解质电池，因此将温度提高至 260℃。



(a) (b)

图 6.13-6 典型的实用化空间飞行器用碱性燃料电池
(a) Apollo 飞船用培根型碱性燃料电池；
(b) 航天飞机用改进型碱性石棉膜燃料电池

美国航天飞机（Space Shuttle）则使用了性能大大提高的碱性燃料电池－石棉膜型电池。该电池为矩形设计，如图 6.13-6（b）所示。其宽度为 38cm、长度 101cm、高度 35cm 和质量为 91kg。电池体系工作电压为 27.5V 时，产生的峰值功率高达 12kW（是阿波罗电池的近 8.5 倍），而在广泛区间内的平均输出功率为 7kW。与早前的碱性电池体系相比，其工作压力范围未变。但在工作温度降低至 80～90℃下，工作电流密度却由 0.8V 下的 150mA/cm² 提高至 0.86V 下的 470mA/cm²。该电池中的电极采用了高载量的贵金属催化剂，负极催化剂为 80%Pt～20%Pd，载量为 10mg/cm²，涂覆在镀银的镍网上；正极催化剂为 90%Au～10%Pt，载量为 20mg/cm²，也涂覆在镀银的镍网上。两个电极都与聚四氟乙烯（PTFE）粘结在一起，以便在 80～90℃下获得高的性能。此处特别使用了一种微孔型隔膜“石棉膜”，利用微孔石棉膜对碱性电解质的强毛细作用，确保可以维持电池工作时与燃料电极和氧（空气）电极建立稳定的三相界面。该电池使用的电解质浓度取 35%KOH。

若与后来发展起来的质子交换膜燃料电池相比，这种碱性燃料电池在航天飞机上应用时，显示工作温度适中，工作压力可在几个千帕范围内任意选择，电流效率高等优点。例如航天飞机采用了改进型碱性石棉膜燃料电池，至今 100 多次飞行中，电池共工作了 8 万多个小时。同时该体系在潜艇和水下机器人中也显示了一定的应用前景。

我国早在 20 世纪 60 年代就进行了 AFC 研究，研制出具有可使用价值的氢氧石棉膜型 AFC 电池体系（除实用的氢气和氧气瓶外），包括静态排水和动态排水型两种。输出功率在 200～600W，峰值可达 1000W，寿命超过了 500h。

3 质子交换膜电解质燃料电池

3.1 氢氧或氢空气质子交换膜电解质燃料电池

氢氧或氢空气 PEM 燃料电池具有工作温度低、能量转换效率高、功率密度高，无电解液，生成物是纯净水，无污染问题，可室温启动，无噪声，使用方便等优点，是电动汽车、AIP 潜艇、小型电站和军事应用等的最佳候选电源。因此对氢氧或氢空气 PEM 燃料电池的研究已经越来越受到各国政府、世界大型汽车公司、燃料电池专业公司、相关研究机构的重视，并投入人力和物力予以研究和进行商业性开发。

3.1.1 工作原理

氢/氧或氢/空气质子交换膜电解质燃料电池的工作原理可以用图 6.13-7 加以说明。

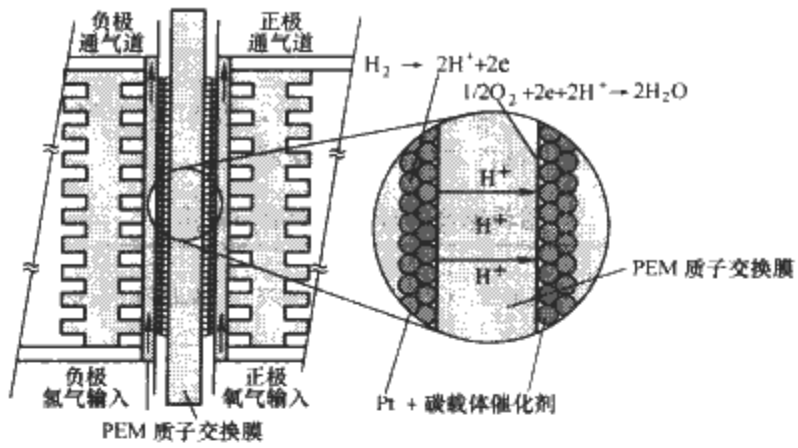


图 6.13-7 质子交换膜燃料电池工作原理示意图

由图 6.13-7 可以看出，负极上发生了氢气的催化氧化反应

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e$$

产生的电子经过外电路到达正极，而氢离子（质子）经过聚合物电解质膜迁移到达正极。氧气于氢离子在正极上发生了氧气的催化还原反应，即

$$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \longrightarrow H_2O$$

由此电池的总反应式为 $2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$

在正极上生成的水不稀释电解质，而是与残余反应气一起通过电极中的气体通道排出，如图 6.13-7 所示。

3.1.2 结构与组成

氢/氧或氢/空气质子交换膜电解质燃料电池的单体结构和电堆结构分别如图 6.13-8 和图 6.13-9 所示。显然电堆是由若干个完全相同的单体串联构成的，与普通电池的组合不同，这种电池采用双极型设计，相邻的两个电池正、负极共用一个导流板。

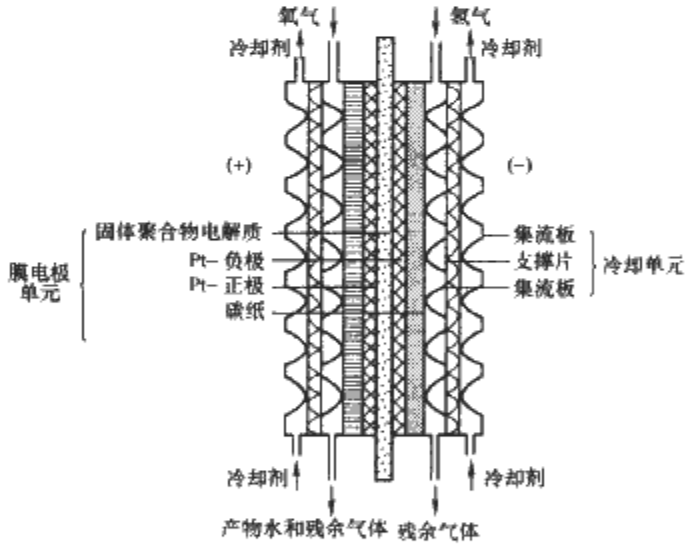


图 6.13-8 典型的单元 PEM 电极结构

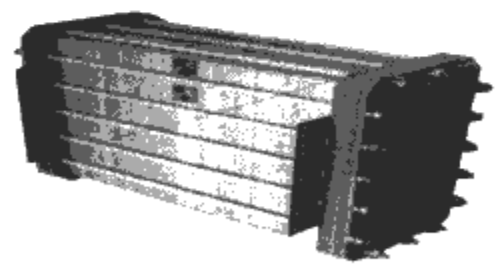


图 6.13-9 典型的 PEM 电堆结构

由图可以看出，氢/氧或氢/空气质子交换膜电解质燃料电池主要由膜电极（是电池的核心件，包含质子交换膜、多孔气体扩散电极（由催化剂、导电剂、憎水层和气体扩散层等构成）和双面设计有流场的双极板。此外在高功率堆中还有专门的冷却单元设计（如图 6.13-8 所示），它是实现电池“热平衡”的必要措施。

3.1.3　关键部件和材料

（1）质子交换膜。在核心部件“膜电极”中，质子传导型固体聚合物膜是形成质子交换膜电解质燃料电池的基础。目前都使用一种全氟磺酸型聚合物膜，它是氢离子（即质子）传导型，故又称为质子交换膜。在燃料电池中质子交换膜是电解质，同时也是隔膜材料，而且还起到电解质和荷载催化剂的作用。

上述质子交换膜的商品名称为“Nafion 膜”，其中“Nafion117”膜是最常用的标准膜。Nafion 膜是在类似聚四氟乙烯的氟聚合物骨架上接有磺酸基团，它显示了优异的化学和热稳定性，既耐强碱的化学浸蚀，又能耐强氧化与强还原酸，甚至耐受 H_2O_2、Cl_2、H_2 和 O_2 在 125℃下的化学作用。目前，Nafion 膜的工作寿命已可达 5000h 以上。但其价格依然很高，一方面期待通过燃料电池实用化推动 PEM 膜产量扩大和降低成本；同时也继续推动寻求新型高性能、低成本质子交换膜的研究工作。

事实上 Nafion 膜的电导率与其中的含水量有着显著的联系，而且随含水量增加成比例增高，如图 6.13-10 所示。显然采用 Nafion 膜的燃料电池必须在保持膜中一定水含量状态下，才能维持 Nafion 膜的质子传输能力，保证电池的连续正常工作。但是随着电池的工作，电池内部温度将要升高，此时固体电解质膜中的水含量会减少。同时，若电池内部水含量过高，电极上的三相反应界面（气—固—液）就可能被淹没，造成反应不能进行。因此保持电池工作过程中 Nafion 膜湿度稳定在一个适当的范围，乃是质子交换膜燃料电池的关键要求之一。由此在这种电池体系设计中通常要进行“水平衡”设计（包括湿度低时需加湿和水过多时需排水），通常在电池堆中设计若干个专门用于加湿的电池单体。

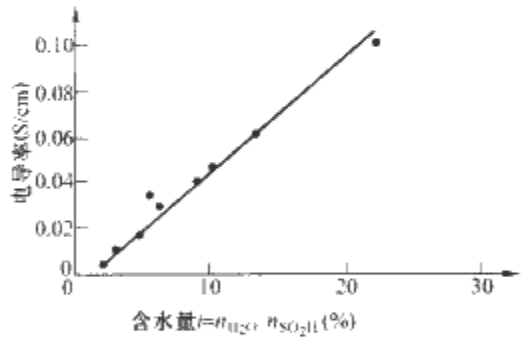


图 6.13-10　Nafion117 膜含水量与电导率的关系

（2）气体扩散（催化）电极。核心部件“膜电极”通常称为三合一组件，是由 PEM 膜和紧贴在其两侧的正、负极气体扩散电极构成。多孔扩散电极一般包含催化层和扩散层，其中扩散层的功能是支撑催化层、电流集流和传导、并提供反应中的气体通道和排水通道。一般由碳纸或碳布制成；催化层是电化学反应发生的场合，是膜电极最核心的部分。一般催化层是高比表面积活性碳上均匀分散的 Pt 组成，常称为 Pt/C 催化剂。在质子交换膜燃料电池的技术进步过程中，电极上采用的贵金属催化剂用量一直在不断下降，图 6.13-11 显示出低载量催化剂电极的典型极化曲线，显然，该种电极在 600mA/cm² 放电下，放电电压依然可以接近 0.7V，相当于 1.5gPt/kW，近来则更进一步降至 1gPt/kW。为了改善 Pt 的利用率，必须将溶解的聚合物结合到碳支撑结构的孔隙中，增加电催化剂和固体电解质间的交面。

（3）导流板。导流板是燃料电池组成的关键部分之一，它的功能是：

1）分隔氧化剂和还原剂，必须具有阻气功能，即不能透气。

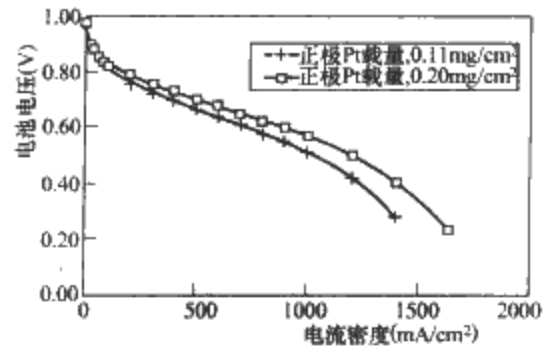


图 6.13-11　低 Pt 载量 PEM 电极的性能曲线图

2）收集与传导电流，因此必需具备良好的导电性能。

3）实现热传导，故应是热的良导体，以保证通过传热达到电池的温度均匀分布。

4）同时承担着燃料和氧化剂气体的输送，并保证反应气体在整个电极各处分布均匀，因此必须有合适的流场结构。

但由于导流板处于强氧化性、强还原性、高极化电位、酸性条件下，因此必须要求导流板材料具有良好的防腐性能。导流板的材料目前主要有不锈钢、钛材和石墨三种。其中不锈钢导电性能良好，价格便宜，易加工，但缺点是不耐腐蚀；钛材耐腐蚀性强，但较易发生氢脆，价格较贵；石墨板耐腐蚀，无氢脆，但机械加工成本高，易碎，电阻较大。

现在多数 PEMFC 依然使用石墨材料，通过机加工或模压流场得到集流板。在用作热管理时，一般采用流体（通常为水）传热来实现冷却（如图 6.13-8 所示），而且在实际电池中则需由泵来完成冷却剂在电池堆中的循环。冷却的目的是保持电池工作温度升高不大于 10℃。这种冷却单元可以与反应物提供通路集成在一起，并承担将反应产物和残余气体带出，如图 6.13-8 所示。为了简化石墨导流板的制造工艺，降低成本，已经开发出模压新技术，如利用超细碳粉一次注塑成型的导流板具有高的导电性、不透气、良好的机械性能、制造工艺简化、成本低等优点。但是近来金属导流板又受到特别关注，原因是其具有适宜批量生产，可以减薄（0.1～0.3mm），能大幅度提高电池输出比功率等优点，已成为发展的新趋势。

3.1.4　燃料的选用

曾经期望使用液体甲醇作为燃料，通过重整得到富氢气体燃料，以替代纯氢燃料，输入 PEM 燃料电池产生电能直接驱动纯电动车辆（称为燃料电池电动车）。但甲醇重整必然有 CO 和 CO_2 产生，而 Pt 催化剂极易吸附 CO 造成中毒，试验表明即使 10ppmCO 就可能影响电池性能。同时虽然 CO_2 的毒害低于 CO，但是它通过与 Pt 上吸附的氢化物反应影响到电极性能。图 6.13-12 总结了 PEMFC 单体电池的性能水平，其中也明显反映出氢燃料中含不同比例 CO_2 和 CO 时，会造成电池性能的下降，其中含 CO 时格外显著。

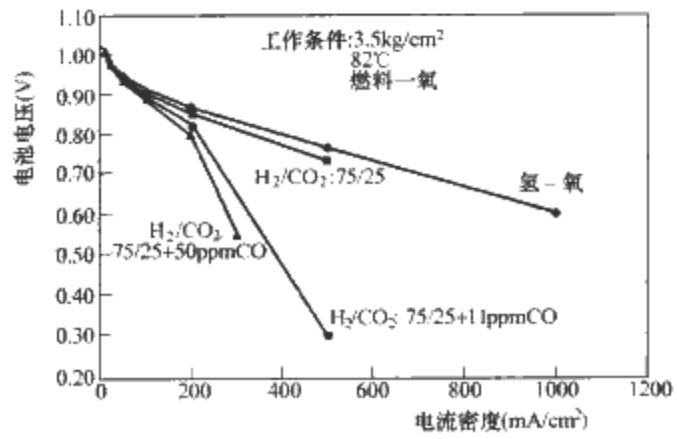


图 6.13-12　电池的性能与燃料组成的关系

因此，在目前发展的燃料电池电动车中，仍然使用了纯氢，它储存在一种轻型的耐压铝合金瓶中，室温及 70MPa 下含纯氢质量比约为 60g/kg，如图 6.13-13 所示。

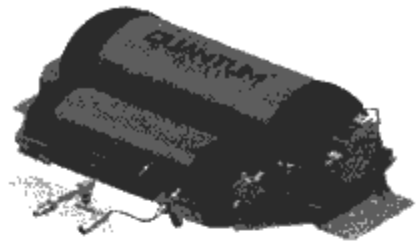


图 6.13-13 一种典型的氢气容器

3.1.5 质子交换膜燃料电池的特性和应用

质子交换膜燃料电池具有比功率大，能量密度高，稳定性好，使用寿命长，与热管理简便，工作温度低，可以在室温下启动等优点。同时其生成物是水，对环境无污染，目前被认为是一种有应用前景新型绿色能源。质子交换膜燃料电池已开始应用于燃料电池电动车辆及军事等众多领域。其中诸多国家都在进行燃料电池公交车的运行评价，也发展了一系列小型燃料电池轿车进行试运行。德国已将 H_2/O_2 质子交换膜燃料电池用于 AIP 潜艇作动力，燃料电池本体部分由 320 对双极性电池组成；电堆尺寸为 176cm×53cm×50cm；重量 900kg；额定功率 120kW；额定电流 560A；额定电压 215V；操作温度 80℃时，效率（20%负载）为 68%。在 2008 年奥运会期间，北京将有三辆奔驰公司组装的燃料电池公交车和若干辆我国自行设计与制造的燃料电池公交车参与运营。国外使用的燃料电池发动机由加拿大巴拉德公司制造，图 6.13-14 显示出一个巴拉德公司制造的 MK—902 电池组照片。其输出功率为 85kW（114HP），工作电流为 300A 和工作电压为 284V，电池组质量为 96kg，体积 75L（尺寸为 80.5cm×37.5cm×25cm），工作寿命为 1500～2000h。自“十五”以来，我国重点开展了燃料电池电动车与燃料电池的研制，图 6.13-15 显示出一个燃料电池模块的典型电压与功率随放电电流密度变化的曲线。可以看出，在 0.2MPa 条件下，电池电流密度达到 1A/cm²，电压 0.65V，膜电极功率密度为 0.65W/cm²，燃料电池堆质量比功率达到 850W/kg。同时 Pt 载量为 1.2g/kW。表 6.13-4 列出了“十五”期间我国研制成功的低压 PEM 燃料电池达到的性能水平，该类电池已组装在燃料电池电动车上进行示范运行与评价。

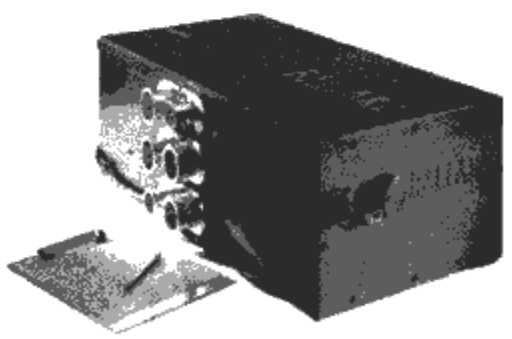


图 6.13-14 巴拉德公司制造的 85kW 燃料电池

表 6.13-4 我国研制的低压氢/空气质子交换膜燃料电池发动机的性能水平

项目名称		大连新源动力	上海神力
功率输出特性	额定功率（kW）	41.7	40.39
	过载功率（kW）	46.1	—
	比功率（W/kg）	150	161
电气性能	系统额定输出功率点效率（%）	46.4	46.26
	电堆额定输出功率点效率（%）	52.4	50.44
	额定输出功率点氢气利用率(%)	95.7	92.65
质量	电池堆（kg）	138	135
	辅助系统（kg）	120	99
	完整系统（kg）	258	234
	冷却水（kg）	起始：19；结束：20	起始：16；结束：20

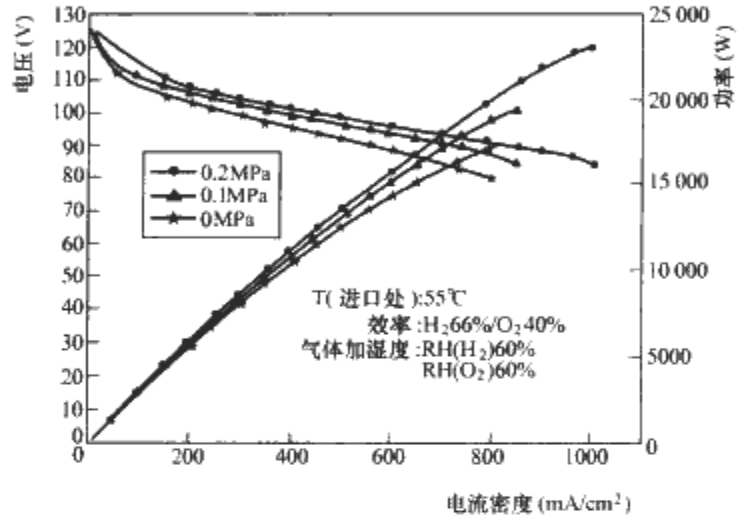


图 6.13-15 我国研制的 PEM 燃料电池模块的典型电压、输出功率与放电电流的关系曲线

3.2 甲醇直接燃料电池

直接使用甲醇作为燃料的燃料电池。其电极反应为

负极 $CH_3OH+H_2O \longrightarrow CO_2+6H^+ +6e$

正极 $6H^+ +6e+\frac{3}{2}O_2 \longrightarrow 3H_2$

其工作过程可分为：

（1）甲醇与水在阳极电催化剂的作用下氧化为氢离子。

（2）氢离子通过质子交换膜到达阴极。

（3）氢离子与该处的氧以及经外电路到达的电子在阴极催化剂的作用下，还原为水（H_2O）。

该电池是将燃料直接通入燃料电池而不需转换成氢，因而无需燃料处理单元，节省了空间和重量；甲醇是液体，价格相对较低，易储存，使用方便，使得甲醇直接燃料电池除具有燃料电池的优点外，还具有体积小，价格低的优势。该电池采用空气中的氧为氧化剂时，其可取用的放电电流密度为 180mA/cm² 至 250mA/cm² 范围内。如采用 Pt/Ru 电极，Pt 载量为 30mg/cm² 时，当在 80℃和电流密度高于 200mA/cm² 下，电压仅为 0.3V；但 Pt 载量为 0.5mg/cm² 时，在 60℃和电流密度高于 100mA/cm² 下，电压达到 0.4V。

甲醇直接燃料电池尚存在的技术问题主要是甲醇穿透膜，造成燃料效率降低，以及电极过电位还过高等。目前设定的商业化最低性能目标是电池工作电压为 0.5～0.6V 时，输出功率密度近似为 200mW/cm²。要使甲醇直接燃料电池技术实用化，还要解决一系列关键技术问题，如反应生成物中有 CO 和 CH_3COOH 等，易使催化剂中毒；甲醇能穿透质子交换膜使利用率降低以及由于反应过电位高，使电池工作电压较低（约 0.4V 左右）。因此需研究既有高催化活性、又能耐 CO 中

毒的催化剂和阻挡甲醇穿透的质子交换膜等新材料等。

在民用领域可作为手机电池和笔记本电池的电源或为其蓄电池充电的电源等。同时它可应用于多种小型武器装备上，例如用作士兵系统、小型无人飞机、野战车载通信设备等的电源。

3.3　再生式燃料电池（RFC）

再生燃料电池（Regenerative Fuel Cell，PEMRFC）是一种特殊的电化学贮能系统，它既可以直接将氢和氧的的化学能转变为电能，并生成产物水（$2H_2+O_2 \longrightarrow H_2O$+电能）；又可以利用外部电源将水电解返回到氢气和氧气（电能+$2H_2O \longrightarrow 2H_2+O_2$），使氢和氧得以“再生”，将化学能量重新储存起来。也就是说，再生燃料电池系统同时包含了氢氧燃料电池和水电解器的功能。由此不再需要外部供应氢气和氧气，就可以利用再生燃料电池构建一个封闭的贮能电池系统。再生燃料电池的比能量可以达到 300～500Wh/kg，有可能成为超过锂离子电池的比能量。

再生燃料电池可以由独立的氢氧燃料电池和电解器联合构成，称为分体式可再生燃料电池；也可以是一个装置实现放电与电解两种功能，称为一体式再生燃料电池。再生式燃料电池所采用的分体式燃料电池和电解池过去选择过三种组合形式，但目前都已转向采用质子交换膜（PEM）的燃料电池和电解池。它包括可以利用较为成熟的质子交换膜燃料电池技术和电解器技术，技术上较容易实现。但其系统装置较一体式庞大、复杂，因而在一些条件苛刻的应用场合。一体式可再生燃料电池（URFC）则因体系更简单，比能量更高而受到青睐。

可再生燃料电池兴起于 20 世纪 80 年代。航天/航空领域对新型高比能量贮能电源的需求直接带动了可再生燃料电池研究的发展。80 年代中期，美国的分体式再生质子交换膜燃料电池电源系统开始进行试验，系统可以反复运作 1 万 h 以上，系统能量效率高达 65%。目前再生燃料电池已经应用于“Helios”高空太阳能无人飞机。也计划将再生燃料电池系统积极应用于今后的空间站，卫星，航天飞机，可重复运载，火星探测器，月球探测器等新型航天飞行器中。

2001 年研制出 50W 的 URFC，其系统比能量较分体式再生燃料电池有很大提高。最近，研制的一体式可再生燃料电池，输出功率达到了 250W，输出能量为 200Wh。

目前在氧电极双效催化剂采用 IrO_2 均匀地沉积在 Pt 表面，可以在不降低一体化体系的电解效率的前提下，提高电池的放电性能。此外还研究了原子比为 4.5∶4∶0.5 的 PtRuIr 催化剂的活性和稳定性能均好于原子比为 1∶1 的 PtRu 催化剂。

我国大连化学物理研究所曾在 20 世纪 90 年代末对可再生燃料电池双效催化剂开展过研究。他们研究发现了质量组成为 50%Pt 和 50%IrO_2 的催化剂对还原氧和氧化水有较好的催化活性。URFC 在 80℃，氢气和氧气的压力均为 0.3MPa，放电电流密度为 400mA/cm² 的条件下，电池的电压达到了 0.7V。而作为电解器 URFC 在 80℃、常压下，电解电流密度为 400mA/cm² 时电压为 1.71V。

再生式燃料电池已开始应用在太阳电池作动力的飞机上，并且各国都在针对平流层飞艇和未来航天器的应用开展实用化技术研究。

4　磷酸燃料电池

磷酸燃料电池的单体结构电化学反应示意图如图 6.13-16 所示，按图上的虚线方向重复叠加如该图的单体即可构成所需要的电堆。

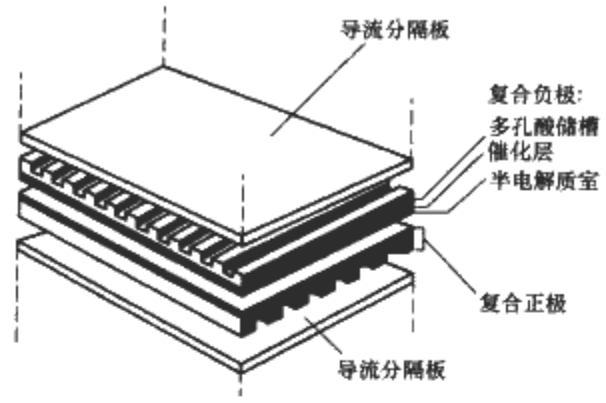


图 6.13-16　磷酸型燃料电池的单体结构示意图

磷酸型燃料电池的反应原理如下式所示

负极反应　　$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$

正极反应　　$1/2O_2 + 2H^+ \rightarrow H_2O$

电池反应　　$1/2O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$

磷酸燃料电池（PAFC）采用 100%的浓磷酸作为电解质，因此其工作温度为 150～220℃，降低温度将导致磷酸离子导电性变差。与碱性电解质体系存在一个相同之处，即 CO 会对负极中的 Pt 催化剂会发生严重中毒。由于磷酸比其他酸类显得特别稳定，同时在 100～220℃较高温度范围工作时，很容易就使水的蒸气压降到最低。该体系采用多孔碳化硅来保持酸，用 Pt 作为正负极的催化剂。虽然在重整的燃料混合气体及空气中都存在 CO_2，但不会与磷酸电解质反应，只是稀释了混合气。鉴于工作温度相对较低，对 CO_2 不敏感等特征，使该体系适合地面应用。但是 PAFC 体系存在一系列缺点，使其应用受到了限制。这包括：①能量转换效率只能达到约 37%～42%，而且体系工作温度低，使余热很难得到较好利用；②磷酸燃料电池要使用昂贵的 Pt 催化剂，成本昂贵；③使用诸如天然气等烃类燃料时，必须要在电池外进行重整，得到富氢燃料；④必须对重整气进行进一步纯化，将其中的 CO 含量降至可以接受的浓度，即至少低于 3%～5%（体积百分比）。这是因为 CO 含量过高，将严重影响到催化剂的功能与作用。

表 6.13-5 总括了自 1965 年以来，磷酸燃料电池技术方面的主要进步。

表 6.13-5　磷酸燃料电池的主要技术进步

组　分	1965 年前后	1975 年前后	现　状
负极构成	PTFE 粘结 Pt 黑	PTFE 粘结 Pt/C	PTFE 粘结 Pt/C
负极催化剂载量	9mg/cm²	0.25mg/cm²	0.1mg/cm²
正极构成	PTFE 粘结 Pt 黑	PTFE 粘结 Pt/C	PTFE 粘结 Pt/C
负极催化剂载量	9mg/cm²	0.5mg/cm²	0.5mg/cm²
电极支撑骨架	钽网	碳纸	碳纸
电解质支撑体	玻璃纤维纸	PTFE 粘合 SiC	PTFE 粘合 SiC
电解质	85%H_3PO_4	95%H_3PO_4	100%H_3PO_4

磷酸燃料电池目前的性能水平可简述如下：正、负极催化剂载量为 0.5mgPt/cm²，工作条件为 180℃，1atm 和 100%H_3PO_4，当工作电流在 100～400mA/cm²，每个电池的工作电压可达到 600～800mV。

磷酸燃料电池是 PAFC 是目前唯一实现小规模商品化的燃料电池，世界范围内已有超过 75MW 的演示装置正在试用或建立中。其中多数是 50～200kW 容量范围，但大型 1MW 和 5MW 电站也已建成。当今运转的最大电站则为 11MW。其中一个发电设施已工作了 49 000h，另外若干个

已工作了 40 000h。

5 熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）

熔融碳酸盐燃料电池单体基本结构及其电化学反应原理表示于图 6.13-17 中。按照图 6.13-17 的说明，该电池的正、负极以及电池反应方程式可归纳如下

负极反应 $H_2+CO_3^{2-}\longrightarrow H_2O+CO_2+2e$

正极反应 $1/2O_2+CO_2+2e\longrightarrow CO_3^{2-}$

电池总反应 $H_2+1/2O_2+CO_2\longrightarrow H_2O+CO_2$

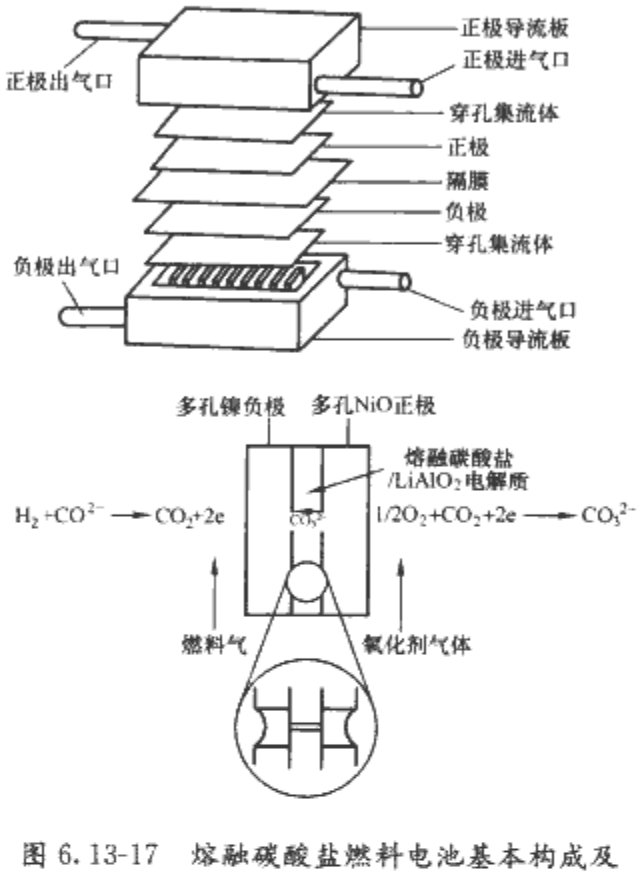


图 6.13-17 熔融碳酸盐燃料电池基本构成及其反应原理示意图

通常这种电池采用两种碱金属碳酸盐的组合，它们是保持在陶瓷材料($LiAlO_2$)的骨架中。该电池工作温度为 600～700℃，此时碱金属碳酸盐呈熔融状态，具有很高的离子导电性。由于温度较高，因此在电池中采用 Ni 为负极和氧化镍作为正极，而无需贵金属催化剂。表 6.13-6 表示出电池正负极和电解质支撑体所用材料的进步历程。

表 6.13-6 熔融碳酸盐燃料电池关键部件和所用材料的发展历程

部件名称	1965 年前	1975 年前	当 今
负极	Pt、Pa 或 Ni	Ni-10%Cr	Ni-Cr/Ni-Al 孔径：3～6μm 初始孔率：45%～70% 厚度：0.20～1.5mm 比表面积：0.1～1m²/g
正极	Ag_2O 或锂化 NiO	锂化 NiO	锂化 NiO 孔径：7～15μm 初始孔率：70%～80% 锂化和氧化后：60%～65% 厚度：0.5～1mm 比表面积：0.5m²/g
电解质支撑体	MgO	α-、β-及 γ-$LiAlO_2$；10～20m²/g	γ-$LiAlO_2$，α-$LiAlO_2$ 厚度：0.5～1mm 比表面积：0.1～12m²/g

显然由于 MCFC 系统工作在 650℃左右，为其带来了一系列优势，包括：

（1）可以采用普通的带状金属，因此可以借助低成本的冲压方法制备电极。

（2）电极反应的催化剂可以选用镍，而不是贵金属。

（3）重整可以在电池内部进行，但要加入重整催化剂。此时重整气中的 CO 不仅不是毒害物质，而成了直接使用的燃料。

（4）排出的热可以用来推动涡轮发动机或产生高的压力蒸气推动蒸气发动机或者通过两者实施共同发电。

（5）MCFC 体系的另一个突出优点是可以有效地使用含 CO_2 的燃料，如生物燃料衍生的气体。这是因为富集的 CO_2 对正极性能有改善作用。

虽然 MCFC 显示了上述优点，但是它也存在一些固有的问题。其中之一是电解质腐蚀性很强，且易于损失。由此需要向正极提供所要求的 CO_2，以生成碳酸盐离子；此外，对硫的许可含量较严格，必须采用合适的重整催化剂加以控制；事实上由于温度较高，面临着一系列材料（包括集流体、壳体、密封材料等）的适用性和耐久性问题，它们已经显著影响到电池体系的工作稳定性和寿命。

目前电池的性能水平可以简述如下：在工作电流密度为 100～200mA/cm² 下，其相应每个单体电池的工作电压可以达到 750～900mV。在此基础上，已有若干座 100～1000kW 的电站正在进行试运行和工程化评价。

6 固体电解质燃料电池

6.1 工作原理

固体氧化物电解质燃料电池使用一种无孔隙率的固体金属氧化物，通常是一种 Y_2O_3-稳定的 ZrO_2。这种电解质要在～1000℃显示高的氧离子电导率，故一般电池也要选择在高达 1000℃左右工作。图 6.13-18 表示出固体氧化物电解质燃料电池的工作原理示意图。由图可以看出在这种电池中，固体电解质中 O^{2-} 离子的传输承担了电荷的迁移功能。而通过电池中负极反应可知，CO 已不是毒害物质，而成为了可用的燃料，参加了提供电能的电化学反应。

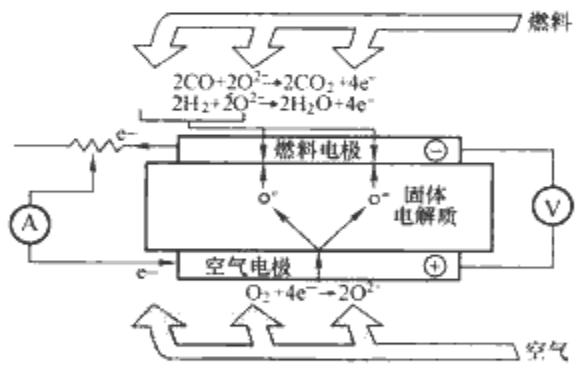


图 6.13-18 固体电解质燃料电池工作原理示意图

从上述工作原理分析不难看出，固体氧化物燃料电池是最为理想的燃料电池体系之一。因为它不仅具有其他燃料电池的共同优点，如高效率与环境友好等。

同时还具有独特的优势，包括：

（1）采用固体电解质可以避免液体电解质中存在的腐蚀问题，也可以阻止气体从一个电极透过电解质到另一个电极上。

（2）可以消除电解质在电极中的流失与淹死问题。

（3）电池在 800～1000℃工作，电极反应动力学非常迅速，故无需贵金属催化剂，使成本得以降低。

（4）与 MCFC 一样，CO 可以直接用作燃料。而且还可以直接应用天然气（甲烷）、煤制气、碳氢化合物以及其他氢化物（如 NH_3、H_2S 等）。

（5）由于 SOFC 在高温下工作，因此其排出的余热可以进一步得到充分利用，既可以用于取暖，又可以用来与蒸气机联用进行循环发电。

6.2　固体氧化物燃料电池的结构和主要组成

固体电解质燃料电池可以有多种结构设计，但主要有两类，即管式和平板式，如图 6.13-19 和图 6.13-20 所示。

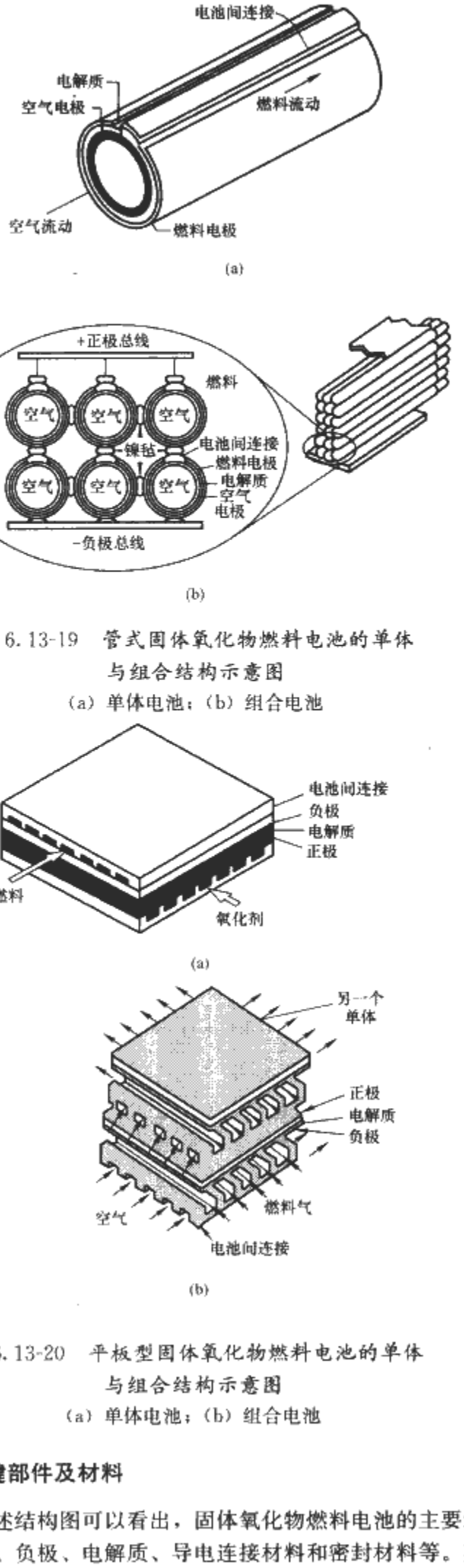


图 6.13-19　管式固体氧化物燃料电池的单体与组合结构示意图
（a）单体电池；（b）组合电池

图 6.13-20　平板型固体氧化物燃料电池的单体与组合结构示意图
（a）单体电池；（b）组合电池

6.3　关键部件及材料

由上述结构图可以看出，固体氧化物燃料电池的主要组成有正极、负极、电解质、导电连接材料和密封材料等。其中电池中一般采用 Co-ZrO_2 或 Ni-ZrO_2 作负极，而采用 Sr 掺杂的 $LaMnO_3$ 作正极，正、负极材料的发展经历可用表 6.13-7 加以说明。

表 6.13-7　固体氧化物电解质电池的关键部件与材料的发展历程

电极类型	1965 年前后	1975 年前后	现　今
负极	多孔 Pt	Ni/ZrO_2 金属陶瓷	Ni/ZrO_2 金属陶瓷，浆料沉积 EVD 固定 膨胀率 12.5×10^{-6} cm/(cm·℃) 厚度 150μm 孔率 20%～40%
正极	多孔 Pt	用氧化镁浸渍稳定的 ZrO_2，并用掺杂 In_2O_3 的 SnO 包覆	掺杂的亚锰酸镧 膨胀率 11×10^{-6} cm/(cm·℃)（室温至 1000℃） 厚度～2mm 孔率 30%～40%
电解质	钇稳定的 ZrO_2 厚度 0.5mm	钇稳定的 ZrO_2	钇稳定的 ZrO_2（8mol% Y_2O_3）EVD 沉积 膨胀率 10.5×10^{-6} cm/(cm·℃)（室温至 1000℃） 厚度 30～40μm
电池间连接	Pt	Mn 掺杂的亚铬酸钴	掺杂的亚铬酸镧 等离子喷涂：10×10^{-6} cm/（cm·℃） 厚度～100μm

为了降低该体系的工作温度，如一般选择在典型的 600～800℃区间，为此正在发展薄膜固体电解质技术，即发展可以实现离子传输的薄膜电解质，在电导率随温度减低而降低时，通过减薄电解质使总电阻降低。

但是如此高的工作温度也带来了问题，首先是材料之间的热膨胀不匹配，使电池间平面处的密封变得困难；高的工作温度使材料选择受到限制，并使制造过程变得非常困难。同时 SOFC 比也显示高的电解质电阻率，导致比 MCFC 低的性能（约低 100mV）。由此十分期待降低这个体系的工作温度，如降至 600～800℃。由于在这种电池中的固体电解质与电极均采用陶瓷组分，而碳不会在陶瓷上沉积，因此该体系可以接受烃类和一氧化碳作为燃料，且内部重整实际在 650℃以上。同样固体组件的应用避免了诸如液体电解质的腐蚀和操作麻烦，而降低了温度就可以采用不锈钢作结构材料，使制造成本得到减低。这种体系的缺点是随着温度降低，电导降低，电极反应速度明显减慢。因此目前的探究重点是减薄电解质和寻求新材料取代。

6.4　电池和电池组的性能

管式结构单体电池的功率密度低于平板型电池，一般为 0.15W/cm^2。但是其电池的性能衰减率降低到 0.2%以下，由此单电池寿命已超过 70 000h。平板型电池工艺相对简单，且功率密度更高，因此仍然是研制与开发的主要目标。

目前设计与组装的管式结构电池组的功率范围大多在 25kW 左右，但也有 100kW 级系统。其工作寿命已经达到数千小时。电池发电效率可以达到 50%，加上高温余热利用效率的 25%，总能量效率在 75%以上。与此相比，较大规模的平板型电池组为 10kW 左右，其在纯氢和纯氧操作下的功率密度高达 0.6W/cm^2（950℃）。但运行 1400h 后，性能却衰减了约 19%。

7 燃料电池技术发展与应用前景

燃料电池技术尚需要进一步发展，并且要大大降低成本，方才可能最终走向应用。然而燃料电池体系的一个特征是其转换效率几乎与尺寸无关，由此可以发展小型高效率燃料电池体系，以避免与建立大型电厂所需的高成本问题、故起始的固定电站锁定在数百千瓦至接近兆瓦级容量。更小的设施则可直接建在用户处，大约为几百千瓦至1～2MW。这些系统是综合型的电站，既提供电能，又提供热能。

更大型的燃料电池电站（1～10MW）可能作为分散电站，这种电站可以主要使用天然气作燃料。要使这种电站得到商业化，就必须进一步改进材料和效率以及成本。

作为电动汽车动力应用，目前提出继续开展研究工作目标，主要是解决三大问题：

（1）降低成本。通过努力进一步减少了贵金属 Pt 的用量，使其由 $1mg/cm^2$ 减至 $0.7mg/cm^2$；当今 PEM 电堆价格已减至 103 美元/kW（2004）；2010 年应降至 30 美元/kW。

（2）低温启动。通过努力可实现－20℃下启动；2004 年已实现在－20℃下启动时，电堆达到输出 50%额定功率的时间为 100s；2010 年－20℃下启动时，电堆达到 90%额定输出功率的时间应不大于 30s。

（3）延长寿命。通过努力使电堆演示寿命，当今 PEM 电堆寿命已超过 2000h（2004）；2010 年应升至 5000h。

（4）提高输出比功率。通过努力使电堆输出比功率超过 1000W/kg。当今 PEM 电堆比功率已超过 1000W/kg（2004）；2010 年应升至 2000W/kg。

第 14 章　太　阳　电　池

本章简述了太阳电池的半导体基本知识、工作原理等。

1　太阳电池的基本结构与种类

太阳电池本质上是一个半导体器件，即 PN 结，它能够吸收太阳光并将电子和空穴分离开并分别进行收集输运到外电路。图 6.14-1 示出了一个简单的太阳电池结构示意图。

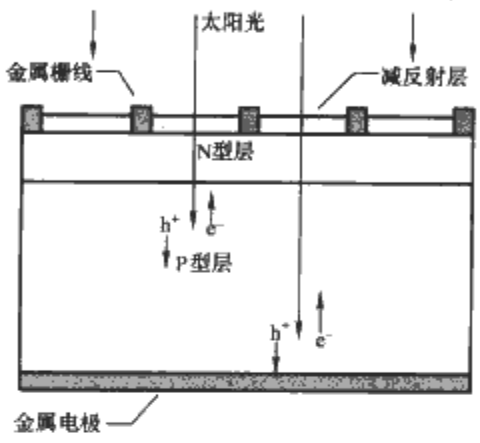


图 6.14-1　太阳电池结构示意图

太阳光从太阳电池的顶部入射到电池内部，金属栅线构成 PN 结的一个电极并允许入射光从栅线之间进入半导体，半导体吸收入射光并将其转换成电能，在栅线之间的减反射膜能够增加入射光的透过率。

太阳电池依靠光伏效应工作，1893 年贝克勒耳首先报道了这一效应，但直到 1954 年，才由贝尔实验室制备出了第一批具有实用价值的硅太阳电池，其光电转换效率只有 6%。随着科技的发展，太阳电池的种类越来越多。出现了 Si、GaAs、GaInP/GaAs/Ge、CdTe、CIS、纳米、量子阱、染料敏化等多种太阳电池。这里以硅太阳电池为例，做一简单介绍。硅太阳电池的输出电压约为 0.5V 上下，其最大输出的功率与表面积有关。例如，一个效率 15%、直径 4 英寸的太阳电池，最大输出功率约为 1.5W。因为单一太阳电池输出电压和输出功率对大部分的电器产品而言是偏低的，因此一般应用时，会将多个太阳电池并联和串联起来形成模块，其中串联的作用是为了提高输出电压，而并联的作用是为了增加输出的电流。若需要再提高模块的输出电压或输出功率，多个模块并联或串联起来就形成阵列，称为太阳电池阵或简称太阳阵。下面，我们就简单地介绍太阳电池的基本结构，因为这是了解太阳电池工作原理、制造工艺，甚至研究发展的第一步。

对于不同材料和制造工艺，太阳电池就有不同的结构。但归纳而言，太阳电池最基本的结构可分为衬底、PN 结、减反射层和金属电极四个主要部分。简单地说，衬底是太阳电池的承载体，PN 结是光伏特效应的来源，减反射层的作用是减少入射光的反射以便增加光电流，金属电极则用于连接器件和外界负载。

单晶硅或多晶硅太阳电池是使用芯片作为衬底，芯片本身就是光电效应区。因为是用芯片作衬底，一般使用扩散工艺，在 P 型芯片做 N 型扩散，或在 N 型芯片做 P 型扩散，形成 PN 结。单晶硅和多晶硅太阳电池都使用晶锭切割而得。工业界使用的太阳电池硅芯片，大都是 P 型。

像Ⅲ-Ⅴ族（如 GaAs、InP、GaN）的太阳电池，则是使用不同的外延技术，像金属有机物化学气象沉积（MOCVD）、分子束外延（MBE）方法等，将 P 型和 N 型晶体直接长在芯片衬底上，而衬底本身通常也不参与光伏特作用。而这样的外延方法的优点就是在器件结构上可以多样化，例如像异质结、多结串联、量子阱、量子点和超晶格等结构。正因为这样，Ⅲ-Ⅴ族太阳电池通常是有较高的效率，但其生产成本也相对的偏高。GaAs 太阳电池可以采用 GaAs 芯片或者 Ge 芯片作为衬底。单结砷化镓电池采用的是 N 型衬底，Ge 衬底不参与光伏作用。三结砷化镓电池采用 P 型衬底，Ge 衬底同时可以制作成底电池。

薄膜太阳电池则可以使用玻璃、塑胶、陶瓷、石墨、金属片等不同材料当衬底，非晶、多晶或单晶的薄膜光伏器件长在衬底上，衬底本身并不参与光伏作用。在薄膜太阳电池制造上，可使用各式各样的沉积技术，一层又一层地把 P 型或 N 型材料长上去。常见的薄膜太阳电池有非晶硅、$CuInSe_2$（CIS）、$CuInGaSe_2$（CIGS）、和 CdTe 等。随着薄膜技术的发展，微晶甚至纳米晶硅薄膜太阳电池也正在被研究开发。薄膜太阳电池最大优点就是生产成本较低，但相对的，其效率和稳定度的问题也尚待解决。

太阳电池的光照面一般都会有减反射层或绒面结构，来减少入射阳光的反射。如果没有减反射层，入射光会有约 30%的反射损失，这对太阳电池而言损失是相当严重的。硅太阳电池可以使用氮化硅（SiN）、氧化硅、氧化钛、氧化铝等来形成减反射层，它不仅能有效的减少入射光的反射，而且还有钝化作用，能够保护太阳电池，有防刮伤、防湿气等功能。除了使用减反射层外，一般单晶硅的太阳能电池，其光照面会先经过绒面化处理，来更进一步地减少入射光的反射。绒面化处理，会在表面留下如同大大小小金字塔结构，让入射光至少要经过电池表面的二次反射，因此就大大的减低入射光经过第一次反射就折回的几率。应该注意的是，因绒面化的金字塔大小约数个 μm，而一般 N 型扩散的深度只有 0.5μm 左右，所以 PN 二极管实际上是形成于绒面化金字塔的表面。

太阳电池需要有金属电极来连接外界的电路。一般而言，太阳电池的正面和背面都有金属电极来提供外界连线的焊接处。背面通常会全部镀涂上一层所谓的背场（BSF）金属层，正面的一个边缘为条状金属电极，并伸展出一列很细的金属栅线。BSF 金属层的可以增加载流子的收集，还可反射掉没有被吸收的光子。金属栅线的设计，一方面要能有效地收集载流子，另一方面要尽量减少金属线遮挡入射光的比例，一般地栅线通常会遮挡 3%～5%的入射光。太阳电池金属电极的材料通常是铝和其他金属的合金，但在薄膜太阳电池，为了达成一次成型的要求，因而正面金属电极会使用透明导电的氧化物（TCO）。

另外，太阳电池还可以使用聚光镜来增加入射光的强度。聚光镜可以是一般透镜，或是特殊结构的菲尼尔透镜。聚光镜的使用，可以大幅的提高系统光照的有效面积。但因

聚光镜要求太阳光必须垂直照射太阳电池，因此应用上必须配合跟踪系统。

2 基本知识

为了更系统地了解太阳电池，我们首先介绍一些与太阳电池相关的简单的太阳辐射以及半导体知识。

2.1 太阳辐射

太阳表面温度为 5762K，其辐射光谱可以由这个温度下的黑体辐射来近似。正如所有的黑体辐射一样，太阳的辐射是各项同性的。由于地球距离太阳非常遥远（约 1.5 亿 km），这就意味着对从地球上观测来说，只有直接向地球发射的光子对太阳光谱有贡献。因此在地球上及其附近，太阳光可以看成是平行光。在大气层上方，太阳光强被称为太阳常数大约是 1.353kW/m²，其光谱分布称为所谓的大气质量为零的光谱（AM0 光谱）。大气质量是一个度量单位，可以度量大气吸收对光谱成分和太阳光强的影响。大气质量由下式给出

$$\mathrm{AirMass} = \frac{1}{\cos\theta}$$

式中：θ 为太阳光入射角；当太阳光垂直入射时 $\theta=0$。可见，在地球表面大气质量总是大于或等于 1。估算大气质量的简便公式如下

$$\mathrm{AirMass} = \sqrt{1+(S/H)^2}$$

式中：S 为高度为 H 的标尺在地面上的投影的长度。普遍应用的地面光强标准为 AM1.5，其光强为 1kW/m²。图 6.14-2 示出了黑体（$T=5762\mathrm{K}$），AM0 和 AM1.5 光谱。

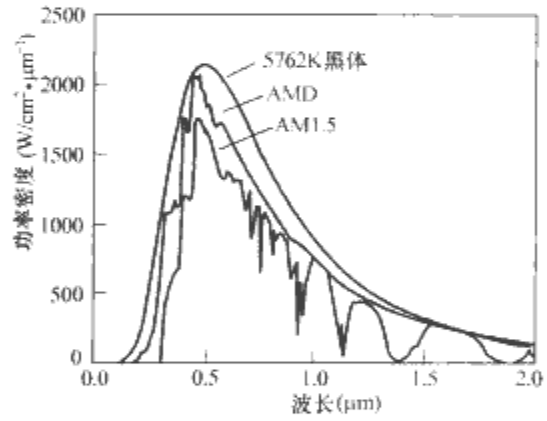


图 6.14-2 黑体（$T=5762\mathrm{K}$）、AM0、AM1.5 光谱分布图

2.2 晶体结构

电子级的半导体是非常纯净的材料，它们的晶体属性意味着其原子排列呈现非常规则的周期性的阵列。这种周期性与原子的属性相结合，为半导体提供了非常有用的电子属性。

硅是Ⅳ族元素，它有四个价带电子，可以和其邻近的原子形成共价键。在晶体硅中，晶格结构为金刚石四面体结构。Ⅲ Ⅴ族元素合成的化合物也都是半导体材料，它们绝大多数具有闪锌矿结构，这种结构与金刚石结构类似，所区别的是它是由两类不同的原子组成。

2.3 能带结构

半导体材料中的电子运动类似于一个粒子被限制在一个三维的盒子里，在盒子里有一个复杂的内部结构，中间为原子核，其周围为电子，共同形成了一个复杂的势场。电子的运动可以由电子波函数表示

$$\nabla^2\psi+\frac{2m}{h^2}[E-U(r)]\psi=0$$

式中：m 为电子质量；h 为简化的普朗克常数；E 是电子能量；$U(r)$ 是半导体内部的周期势能。

上式确定了半导体的能带结构，同时它还告诉我们，如果我们使用有效质量来代替通常的质量，就可以用经典力学中的牛顿定律来表示电子的运动。即

$$F=ma$$

式中：F 为施加的力；a 为电子的加速度。允许的电子能量由电子动量，$p=hk$ 来表示，这里 k 是波矢。如果假定价带以下的能带全部被电子占据而导带为全空，电子的有效质量就可以表示为下式

$$m^*=\left[\frac{\mathrm{d}^2E}{\mathrm{d}p^2}\right]^{-1}=\left[\frac{1}{h^2}\frac{\mathrm{d}^2E}{\mathrm{d}k^2}\right]^{-1}$$

请注意，有效质量在每个能带并不是常数。在价带顶，有效质量是负的。价带顶和导带底在形状上类似于抛物线，因此处于导带底的电子有效质量是常数。同样处于价带顶的空穴有效质量也是常数。图 6.14-3 示出了一个半导体的简单能带图。

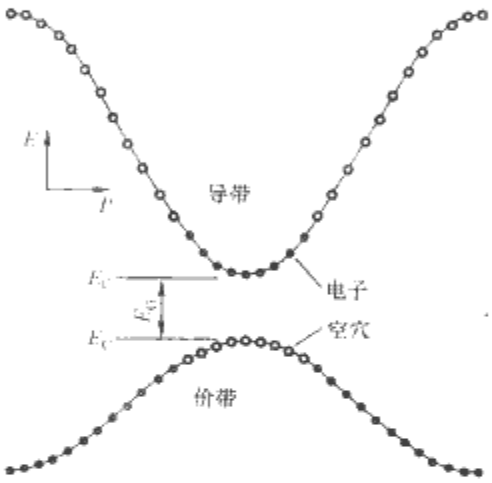


图 6.14-3 半导体能带示意图

当导带的最小值和价带的最大值位于相同的波矢位置时，称为直接带隙半导体。当不处于同一位置时，称为间接带隙半导体。

非晶材料也具有类似的能带结构。在很小的尺寸范围内，非晶材料以周期方式排列，因此也可以定义电子波函数。不同于晶体材料的是，在带隙中有大量处于带隙之间的能量状态，这使得对非晶材料器件的分析变得复杂。

2.4 载流子浓度及连续性方程

半导体的能带结构使其适合于光伏应用。在低温时，任何半导体的价带都被占满，而导带是空的。然而，在室温时，由于电子的热运动可以使一些电子激发到导带，一个能量状态被占据的概率由费米-迪拉克分布给出

$$f(\varepsilon)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{(\varepsilon-\varepsilon_\mathrm{F})/kT}}$$

式中：$f(\varepsilon)$ 为占据的概率；ε_F 为费米能级的能量；T 为温度。

另外在导带中的电子状态密度 $[g_\mathrm{e}(\varepsilon)]$ 和价带中的空穴状态密度 $[g_\mathrm{h}(\varepsilon)]$ 可以用下式表示

$$g_\mathrm{e}(\varepsilon)=\frac{8\sqrt{2}\pi m_\mathrm{e}^{*3/2}}{h^3}(\varepsilon-\varepsilon_\mathrm{c})^{1/2}\mathrm{d}\varepsilon$$

和

$$g_\mathrm{h}(\varepsilon)=\frac{8\sqrt{2}\pi m_\mathrm{h}^{*3/2}}{h^3}(\varepsilon_\mathrm{v}-\varepsilon)^{1/2}\mathrm{d}\varepsilon$$

式中：m_e^*、m_h^* 为在导带的电子和在价带的空穴有效质量；ε_c 为导带能量；ε_v 为价带能量。通过以上两式，可以推导出导带中电子浓度公式，其简式可以写成下式

$$n = N_c e^{(\varepsilon_F - \varepsilon_c)/kT}$$

价带中的空穴浓度为

$$p = N_v e^{(\varepsilon_v - \varepsilon_F)/kT}$$

式中：N_c 和 N_v 就是所谓的价带和导带的有效状态密度。以上两式对于纯净的和掺杂的半导体都是有效的，尽管后者的费米能级有所漂移。太阳电池中电流的输运是基于空穴和电子的输运方程、连续性方程和泊松方程的。这里是以一维形式表示的

$$J_e = q_0 \mu_e n\xi + q_0 D_e \frac{dn}{dy}$$

$$J_h = q_0 \mu_h p\xi + q_0 D_h \frac{dp}{dy}$$

$$\frac{1}{q_0}\frac{dJ_e}{dy} = F - G$$

$$\frac{1}{q_0}\frac{dJ_h}{dy} = -(F - G)$$

$$\frac{d\xi}{dy} = \frac{q_0}{\varepsilon}(p - n + N_D - N_A)$$

式中：J_e 和 J_h 为电子和空穴的电流浓度；μ_e 和 μ_h 为电子和空穴的迁移率；ξ 为电场；q_0 为基本电荷常数；D_e 和 D_h 分别为电子和空穴的扩散系数；F 为载流子复合速率；G 为产生速率；N_D 为 PN 结 N 型区施主浓度；N_A 为 P 型区受主浓度。

2.5　PN 结

除非被光子激发到导带的电子和空穴被分开，否则它们最终还是要复合。这就是说要利用光子的能量，在半导体材料中，必须存在一个电场能够将电子和空穴分开。该电场可以在 PN 结中产生，PN 结可以通过将 N 型半导体材料和 P 型半导体材料结合在一起的形式制成，基体材料可以是同种材料如硅太阳电池，也可以使不同种材料如 CdTe 和 CIS 太阳电池，其 N 型材料采用的是 CdS 材料。N 型半导体材料采用掺杂五族元素、P 型半导体材料采用掺杂三族元素的方法获得。PN 结能带形式如图 6.14-4 所示。P 型半导体材料的费米能级接近价带，而 N 型半导体的费米能级接近导带，当两种材料结合在一起的时候，结两侧的费米能级必须相等，因此产生能带弯曲并在结附近产生一个电场。如果连接一个外电路，光生电流就可以利用了。

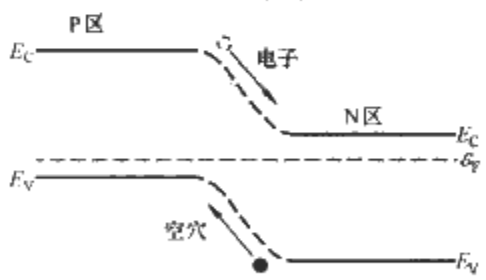


图 6.14-4　P/N 结能带示意图

在所谓的空间电荷区即能带弯曲区附近产生的载流子才能够在它们复合之前穿过空间电荷区。电场驱使在 P 型区导带产生的电子进入 N 型区导带，同时驱使 P 型区价带产生的空穴进入 N 型区价带。当然，入射光并不只是在空间电荷区被吸收才会产生光电流，光子在 PN 结的其他区域被吸收也能贡献电流，只是在准电中性区的光电流是扩散电流，而不是漂移电流。这个 PN 结工作方式如同二极管，其电流只向一个方向流动。

3　太阳电池的工作原理

太阳电池吸收太阳光就能产生一般电池的功能。但是和一般传统的电池不一样的是，一般传统的电池的输出电压和最大输出功率是固定，然而太阳电池输出电压、电流，与功率和其照光条件与负载的工作点有关。正因如此，要应用太阳电池的来产生电力，必须了解太阳电池的电流-电压关系，及其工作原理。

3.1　太阳电池的电路模型

一个太阳电池没有光照时，它的特性就是一个 PN 结，也就是一个二极管。通过对在过渡区载流子输运方程的推导，可以得到一个理想的二极管其电流-电压关系式

$$I = I_s(e^{V/V_T} - 1)$$

式中：I 为二极管电流；I_s 为饱和电流；V 为二极管电压；$V_T \equiv k_B T/q_0$；q_0 为基本电荷；T 为温度。当有光照时，该方程可以修正为下式

$$I = I_0(e^{qV/k_B T} - 1) - I_L$$

在室温下，$V_T \approx 0.026$V。需注意的是，二极管电流的方向是定义在器件内从 P 型流向 N 型，而电压的正负值，则是定义为 P 型端电压减去 N 型端电压。因此如果遵循这个定义，太阳电池工作时，其电压值为正，电流值为负。这里必须提醒读者的是，所谓的理想二极管是定义在许多物理条件上，而实际的二极管自然会有一些非理想的因素影响器件的电流—电压关系，例如产生—复合电流，这里我们不多做讨论。

当太阳电池受到光照时，PN 结内就会有光电流。因为 PN 结的内建电场方向是从 N 型指向 P 型，因此光子被吸收产生的电子-空穴对，电子会往 P 型端跑，而空穴会往 N 型端跑，因此电子和空穴二者形成的光电流会由 N 型流到 P 型。因为一般二极管的正电流方向是定义为由 P 型流到 N 型。因此相对于原本的理想二极管，太阳电池照光产生的光电流乃一负向电流。而太阳电池的电流—电压关系就是理想二极管加上一个负向的光电流，见下式

$$I = I_s(e^{V/V_T} - 1) - I_L$$

式中：I_L 为光生电流。上式确定了理想太阳电池（此时 $R_S = 0$，$R_{SH} \to \infty$）的电流电压关系。以上方程可如图 6.14-5 所示：

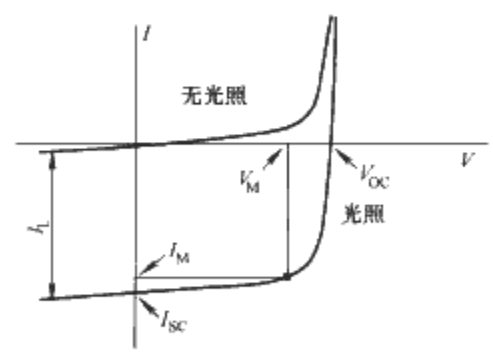


图 6.14-5　太阳电池光照与无光照情况下的 I—V 曲线

从图可以看出，二极管暗特性曲线位于第一和第三象限，而二极管光照特性曲线还穿过了第四象限。正是在第四象限，电流为负电压为正，也就意味着太阳电池输出了电能。这里有四个重要的参数一定要记住，分别为：位于 0 电压时的电流，称为短路电流，用 I_{sc} 表示；位于 0 电流时的

电压，称为开路电压，用 V_{oc} 表示；最大功率输出点时的电流和电压，分别用 I_{pmax} 和 V_{pmax} 表示。对于太阳电池来讲，由于只有位于第四象限的 I—V 曲线与太阳电池的应用有关，因此一般地，I—V 曲线被反转到第一象限，此时电流和电压都为正值。

也就是说，没有光照的情况下，$I_L = 0$，太阳电池就是一个普通的二极管。当太阳电池短路时，也就是 $V = 0$，其短路电流则为 $I_{sc} = -I_L$。也就是说当太阳电池短路，短路电流就是入射光产生的光电流。若太阳电池开路时，也就是 $I = 0$，其开路电压则为

$$V_{oc} = V_T \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right)$$

这里必须强调的是，开路电压和短路电流是太阳电池特性的两个重要参数。

太阳电池输出的功率就是电流和电压的乘积

$$P = IV = I_s V(e^{V/V_T} - 1) - I_L V$$

很明显，太阳电池输出的功率并非是个固定值，它在某个电流－电压工作点达到最大值，而这最大输出功率 P_{max}，则可由来 $dP/dV = 0$ 来决定。由此可以推导得出最大输出功率 P_{max} 时输出电压为

$$V_{Pmax} = V_T \ln\left(\frac{I_L/I_s + 1}{V_{Pmax}/V_T + 1}\right)$$

输出电流为

$$I_{Pmax} = I_s \frac{V_{Pmax}}{V_T} e^{V_{Pmax}/V_T}$$

太阳电池最大输出功率

$$P_{max} = I_{Pmax} V_{Pmax}$$

太阳电池的效率（Efficiency）就是指太阳电池将入射光的功率 P_{in} 转换成最大输出之电功率的比例，即

$$\eta \equiv \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

一般的太阳电池的效率量测，都是使用 $P_{in} = 1000\text{W/m}^2$ 的类似太阳光的灯光光源。

实际上，太阳电池的电流—电压关系并没有百分之百遵循上述的理论描述，这是因为太阳电池器件本身存在所谓的串联电阻和旁路电阻。因为任何半导体材料本身，或是半导体与金属的接触，无可避免的都会有或多或少的电阻，如此就会而形成光伏器件的串联电阻。另一方面，光伏器件的正负电极间，存在任何非经由理想二极管的其他电流的通道，都会造成所谓的漏电流，例如器件中的产生—复合电流，表面复合电流，器件的边缘隔离不完美以及金属接触穿透 PN 结等。通常，我们使用旁路电阻用来定义太阳电池的漏电流大小，也就是 $R_{sh} \equiv V/I_{leak}$。旁路电阻越大，就表示漏电流越小。如果考虑串联电阻 R_s 和旁路电阻 R_{sh}，太阳电池的电流—电压关系则可写成

$$I = I_s[e^{(V-IR_s)/V_T} - 1] + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_L$$

据此，我们可以画出太阳电池的等效电路图，见图 6.14-6。图中电流源相当于在空间电荷区附近由光子产生的载流子，二极管与电流源以并联的方式连接，这是因为载流子被电场拉向相反的方向。旁路电阻也是并联连接是因为漏电损失，串联电阻 R_s 包括体电阻、接触电阻等等。

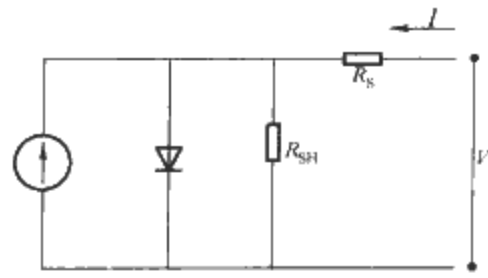


图 6.14-6 太阳电池等效电路图

也可以只用一个参数——填充因子，来同时概括串联电阻与旁路电阻两个效应。其定义为

$$FF \equiv \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}}$$

很明显，没有串联电阻，且旁路电阻无穷大（没有漏电流）时，填充因子最大。任何的串联电阻的增加或旁路电阻的减少，都会减少填充因子。填充因子表示了产生的功率与理想的无任何损失的方型 I—V 曲线下功率的比值。在研究太阳电池时填充因子是非常重要的参数，它们揭示了太阳电池的优劣程度。

如此一来，太阳电池的效率就可以由三个重要参数：开路电压 V_{oc}、短路电流 I_{sc}、和填充因子 FF 来表达

$$\eta = \frac{FFI_{sc}V_{oc}}{P_{in}}$$

很明显，要提高太阳电池的效率，则要同时增加其开路电压、短路电流（亦即光电流），和填充因子（亦即减少串联电阻与漏电流）。

3.2 短路电流与开路电压

当然由前面的公式来看，太阳电池的开路电压是由光电流和饱和电流决定。但如果纯粹就物理的观点而言，开路电压就等于空间电荷区中电子和空穴间的费米能差。至于理想 PN 结的饱和电流，则可以用下式表达

$$J_s = q_0 n_i^2 \left(\frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} + \frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}\right)$$

式中：q_0 为单位电量；n_i 为半导体的本征载流子浓度；N_D 和 N_A 为施主和受主的浓度，D_n 和 D_p 为电子和空穴的扩散系数，τ_n 和 τ_p 为电子和空穴的复合时间。当然上面的表达式是假设 N 型区和 P 型区都很宽的情况。一般使用 P 型衬底的太阳电池，N 型区都非常的浅，上面的表达式是需要修改的。

前面已提到，当光照太阳电池时产生光电流，而光电流就是太阳电池电流—电压关系中的闭路电流，这里就光电流的由来，做一简单叙述。载流子在单位体积的产生率（单位 $\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$）是由光吸收系数来决定，即

$$g_L(x) = \alpha\phi_{inc}(1-R)e^{-\alpha x}$$

式中：α 为光吸收系数；ϕ_{inc} 为入射光子强度（或称为光子流量密度）；R 为反射系数，因此 $\phi_{inc}(1-R)$ 代表没被反射的入射光子强度。而产生光电流的主要三个机制为：少数载流子电子在 P 型区的扩散电流、少数载流子空穴在 N 型区的扩散电流、和电子和空穴在空间电荷区的漂移电流。因此光电流约可表达为

$$J_L = J_n + J_p + J_{sc} \approx q_0 g_L(L_n + L_p + W)$$

式中：L_n 和 L_p 为 P 型区电子和 N 型区空穴的扩散长度；W 为空间电荷区的宽度。归纳这些结果，可得到开路电压的简单表达式

$$V_{oc} = V_T \ln(I_L/I_s + 1) \approx V_T \ln(g_L/r_{rec} + 1)$$

式中：r_{rec} 为电子—空穴对的单位体积的复合率。当然这是很自然的结果，因为开路电压就等于空间电荷区中电子和空穴间的 Fermi 能差，而电子和空穴间的 Fermi 能差就是由载流子产生率与复合率来决定。

3.3 光谱响应

因为任何材料的折射系数 $n(\lambda)$ 和光吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 都是

波长的函数，因此入射光中不同的波长对光电流就有不同的贡献。用公式表达为

$$J_L = \int_0^{\lambda_{Eg}} \overline{J}_L(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

式中：λ_{Eg} 是描述入射光能量须约大于禁带宽度才会被吸收。而光谱响应 $S_r(\lambda)$ 的定义，通常只是用来描述 PN 结对不同波长的光电流贡献，因此必须除去光入射的光子强度 $\vec{\varphi}_{in}(\lambda)$ 和其反射系数 $R(\lambda)$ 的效应

$$S_r(\lambda) \equiv \frac{\overline{J}_L(\lambda)}{q_0 \vec{\varphi}_{in}(\lambda)[1-R(\lambda)]}$$

光子强度 $\vec{\varphi}_{inc}(\lambda)$、光谱照度 $\overline{I}_{in}(\lambda)$、与入射光的功率 P_{in} 之间的关系可以用

$$\overline{I}_{in}(\lambda) = h\nu\vec{\varphi}_{inc}(\lambda)$$

和

$$P_{in} = \int \mathrm{d}x \int \mathrm{d}y \int \mathrm{d}\lambda \overline{I}_{in}(\lambda)$$

来表示。其中 $h\nu$ 代表光子的能量。

以上论述，都是针对 PN 结之类的光伏器件，但必须注意的是，这并非是太阳电池的唯一结构。例如，非晶硅光伏特电池通常是使用 Pin 的结构。而除了单一半导体材料形成同质结之外，也可以使用不同半导体材料形成异质结太阳电池。太阳电池的构成也不一定要全是半导体，金属—半导体接触形成的肖特基二极管，和 MOS 结构类似的金属—绝缘体—半导体（MIS），有机物或聚合物都可用来当太阳电池。太阳电池也不一定只是通过光伏效应，染料敏化电池的光电化学效应也可以经照光后产生电压。但无论如何，PN 结的光伏器件总是一个参考指标，而像开路电压、短路电流和填充因子，更是规范所有太阳电池的参数。

4　太阳电池效率限制因素

太阳电池技术的发展最主要的仍在于提高太阳电池本身的效率。这原因是，一方面，至今实验室产出的太阳电池其最高效率纪录尚未接近理论的极限，另一方面，市场上大量生产的太阳电池平均效率和实验室的太阳电池的最高效率纪录又有一段不小的差距。这两个差距，将是未来太阳电池技术的研究发展必须克服解决的两个最重要课题。

由于只有大于禁带宽度能量的光子才能产生电子空穴对，才能对太阳电池的输出有贡献，因此，半导体材料的禁带宽度必须与太阳光谱相匹配。可以采用一种简单的方法来预测太阳电池的最高效率，如果假定所有的大于禁带宽度能量的光子全部被吸收，则最大效率可以表示成下式

$$\eta_{max}(E_G) = \frac{\frac{1}{q}E_G I_{inc}}{P_{in}} = \frac{E_G}{(P_{in}/A)}\int_{\lambda<\lambda_G} f(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

图 6.14-7 示出了在 AM1.5 条件下理论上各种禁带宽度下太阳能电池的最高效率，由图可以看出，当 $E_G = 1.1\mathrm{eV}$ 时，达到理论上的最高效率 48%。当然这里假设 $V_{oc} = \frac{1}{q}E_G$ 并且填充因子为 1 的情况。实际上单晶硅太阳电池的最高效率应为 28%，但是实验室产生的世界纪录最高效率为 24.7%。相同地，双结、三结太阳电池其最高效率可达的理论极限应为 56%，然而实验上使用 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的世界纪录最高效率为 32.0%。很明显地，实验室产出的太阳电池其最高效率纪录和理论上的极限值依然有一段差距。而就单晶硅太阳电池而言，其目前市场上大量产的平均效率约只在 15%上下，也就是说，市场上大量产的太阳电池平均效率和实验室的太阳电池的最高效率纪录又有一段不小的差距。未来太阳电池技术的研究发展最主要还在于如何填补这两个差距。但是这种最简单的方法能够给出禁带宽度与效率之间的关系并确立了禁带宽度在决定太阳电池性能的重要作用，由图 6.14-7 也可以看出当禁带宽度在 1.0 和 1.6 之间时，太阳电池能够达到最大的光电转换效率。

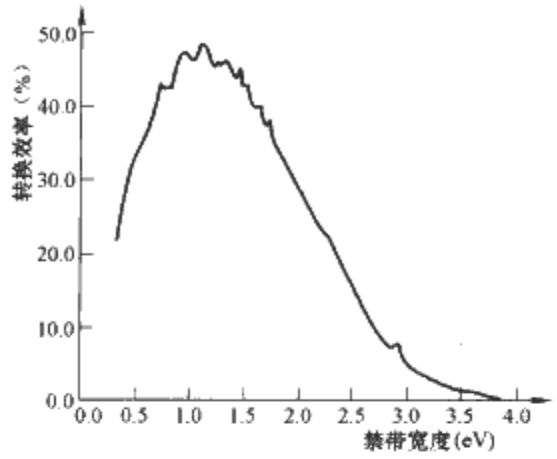


图 6.14-7　电池效率与禁带宽度之间的关系

如果禁带宽度足够窄，入射的光子能够使价带电子激发到导带。电子进入导带后，在价带产生一个空穴，这个空穴起的作用也象载流子一样。要想再半导体内有一个电压维持，也需要禁带宽度足够宽以防止电子和空穴马上复合。表 6.14-1 列出了常用的几种光伏材料在室温下的禁带宽度。其中，CIS 材料的禁带宽度可以通过掺 Ga 来增加。除了禁带宽度，直接带隙或者间接带隙半导体的电子激发能力有很大区别，比如间接带隙的硅材料的光吸收能力远远低于直接带隙的 GaAs、CdTe、和 CIS 材料。

表 6.14-1　几种常用的光伏材料在室温下的禁带宽度

材料	Si	GaAs	CdTe	CIS
禁带宽度（eV）	1.1	1.4	1.5	1.0

波长小于 800～850nm 的光子能够激发上述材料的电子到导带。但是高能量的光子并不能比低能量的电子产生更高的光电压，这是因为被激发的电子很快就下沉到导带底，多余的能量以热的形式耗散掉。在理论上产生的能量总是等于材料的禁带宽度能量。实际上要小于禁带宽度的能量，这是因为在太阳电池中不可能将所有的禁带宽度的能量全部转换为输出能量。因此，在光伏器件中，有三种固有的能量损失机理：

（1）能量高于禁带宽度的光子在激发电子到导带后，其多余的能量以热的形式损失掉。

（2）能量较低的光子不能激发电子到导带，它们的能量也以热的形式损失掉。

（3）在 PN 结中只有一部分禁带宽度的能量转换为输出能量，例如对于晶体硅太阳电池，只有 60%左右。

以上损失机理是限制最大理论效率的重要因素。实际的太阳电池由于材料中缺陷的存在和电阻损失，其效率更低。

一般的太阳电池理论，将半导体太阳电池的效率限制区分为三种不同的物理限制：

（1）单结太阳电池的限制（最高效率约 31%）。

（2）多结太阳电池的限制（最高效率约 69%）。

（3）热力学的限制（最高效率约 85%）。

针对效率限制中的物理限制和其相对应的可能解决方法简述如下：

一般而言，单一半导体做成的太阳电池，假设所有的入射光子，只要其能量大于半导体的禁带宽度，都将被吸收而产生一个电子－空穴对。产生的电子和空穴又遵循理想 PN 二极管的工作原理输出电压电流，则这样的太阳能电池，当其禁带宽度为 1.35eV，其最高效率能达 31% 。对于单晶硅半导体太阳能电池，理论上其最高效率应有 28%。但很明显，这只是理论上最佳的估计。而实际上，即使是绒面和减反射膜也不能保证消除所有的反射。金属栅线的遮挡也不能让所有照射到太阳电池上太阳光完全百分之百地入射。由于材料本身的限制，也不能保证能量大于半导体的禁带宽度的入射光子都可以被吸收。因为存在像自由载流子吸收等其他光吸收过程，被吸收的光子也不完全百分之百地产生电子－空穴对。芯片的品质、材料本身、或制造过程的不完善，所可能引起的电子－空穴复合电流、串联电阻、并联电阻，也无法让太阳能电池输出电压电流关系百分之百遵循理想的 PN 二极管。

至于如何超越单结太阳电池的物理限制，最明显的方法，就是使用多结结构。在单结太阳电池中，只要是能量大于半导体的禁带宽度的入射光子可以被吸收产生电子－空穴对。这样一来，不管入射的光子的能量有多高，大于半导体的禁带宽度的部分的能量，就会提供产生电子和空穴相对于禁带宽度的额外动能而处于高能态，而这高能态的电子和空穴便会以释放声子的方式回到带底附近。也就是说，光子能量多于半导体禁带宽度的部分，就会以发射声子的方式释放给声子，声子的能量增加自然表现在晶体温度的增加。使用多结结构，最主要的用途是要减少这种不必要的能带内的能量释放，减少释放声子的机会，减少热能的产生。其器件结构设计，就是要让入射的光子先通过高禁带宽度的 PN 二极管，先吸收高能量的的光子，然后再通过低禁带宽度的 PN 二极管，后吸收低能量的光子，而不同禁带宽度的 PN 二极管之间，通常使用隧穿二极管（Tunnel Diode）将他们联结起来。隧穿二极管的功用，在使低禁带宽度的电子，通过隧穿效应和高禁带宽度的空穴复合，如此一来，器件的输出电压，就约等于是二个不同禁带宽度的 PN 二极管之电子和空穴 Fermi 能差之总和。也因为如此，多结太阳电池一般都有相当高的开路电压。

即使是使用多结太阳电池来有效地解决载流子能带内的能量释放的物理限制，但最终不免要面对另外一个物理限制—载流子能带间的能量释放。载流子能带间的能量释放自然是经由电子—空穴对复合的过程。电子－空穴对复合的有三种可能机制：光发射、多声子发射和俄歇过程，如果从能量传输的观点来看，其中光发射是载流子将能量传给光子，多声子发射则是载流子将能量传给声子，而俄歇过程中只是载流子之间互相交换能量。理论上，我们如果能抑制载流子能带间的光发射和声子发射这二个物理过程，就能阻止载流子能带间的能量释放，而让载流子一直保有自身的能量。如此一来，载流子的平均能量就会增加，而其载流子温度也因此而提高，造成所谓热载流子现象。而热载流子效应能有效提高太阳电池的效率，这将在下文做进一步的阐述。

然而直到现在，尚未有任何明确的实验结果，能证实有效地解决太阳电池的载流子能带间的能量释放问题。虽然理论上新颖的构想曾被提及，例如，利用光子晶体结构来有效的抑制光自发发射，或是利用声子晶体结构来有效的抑制声子发射。我们不免要问，假使太阳电池以理想 PN 二极管的方式工作，然后我们再使用多结太阳电池来解决载流子能带内的能量释放的问题，又假设我们能再进一步技术上克服太阳电池的能带间的能量释放的物理限制，那么到底太阳电池的终极效率是多少？关于这个问题，可以使用热力学观点来做一简单的探讨与说明。

由太阳发光的光谱来看，太阳大约可视为是一黑体辐射，其表面温度约为 $T_s = 5762\text{K}$，假设我们能同时有效地抑制太阳电池内载流子的能带内和能带间的能量释放，也就是说，太阳电池内的载流子和声子没有能量交换，因此载流子和声子有各自的温度。我们以 T_c 代表载流子的温度，而以 T_a 代表声子的温度。通常声子的温度就等于所谓环境温度，也就是外界负载的温度。我们就将太阳光子、太阳电池内的载流子和外界负载视为三个不同的热力学系统。我们知道，任何一温度为 T 的理想黑体辐射，其辐射总能量密度是遵循所谓的斯蒂芬－伯尔兹曼定律为 σT^4 ，其中 σ 为伯尔兹曼常数。由辐射热传的原理得知，假设太阳光子和太阳电池内的载流子都是理想的黑体辐射，则太阳光子传输给太阳电池内的载流子的能量密度将为 $\sigma(T_s^4 - T_c^4)$。而又根据热力学第二基本定律的结果，载流子温度为 T_c 的太阳电池，对环境温度为 T_a 的外界负载，所能做的最大的功（输出的能量）的效率乃为卡诺循环引擎来决定，为 $1 - T_a/T_c$。把这两个效应一起考虑的话，能量从太阳光子经由太阳电池至外界负载的效率将为

$$\eta = \left[1 - \left(\frac{T_c}{T_s}\right)^4\right]\left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right)$$

已知太阳表面温度 $T_s = 5760\text{K}$，而环境温度假设为 $T_a = 300\text{K}$，则太阳能电池内的载流子温度为 $T_c = 2470\text{K}$，太阳能电池将有最高效率 $\eta_{max} = 85\%$。而这是太阳电池以理想 PN 二极管的方式工作，并且去除载流子能带内的能量释放（使用多结结构）和能带间的能量释放后，所能得到的最高效率。

第 15 章　单晶硅太阳电池

1　硅太阳电池的发展简史

自 1954 年世界上第一个有实际意义的太阳电池问世以来，到目前为止，硅太阳电池包括单晶硅和多晶硅太阳电池的制造仍然占太阳电池的主导地位。这是因为，一方面硅是具有良好的电子、物理以及化学稳定性，同时相对于其他微电子材料具有较好的稳定性；另一方面是由于硅在微电子方面的成功应用产生了显著的经济优势，这个优势使得太阳电池工业直接受益。

硅太阳电池的发展与硅电子及微电子行业的发展有着千丝万缕的联系，20 世纪 40 年代掺杂技术的快速发展使得太阳电池研究成为可能，出现了早期的太阳电池。虽然其效率只有百分之零点几，但与之前的硒和氧化亚铜电池相比已经有了很大的进步。由于单晶硅的生产工艺方法的改进以及贝尔实验室开发的高温扩散产自方法的应用，1954 年出现了效率达到 6%的太阳电池。太阳电池的空间应用进一步推动了太阳电池的快速发展，60 年代，地面效率达到 15%的太阳电池研制成功。70 年代，COMSAT 实验室研究表明浅结扩散工艺更适合太阳电池的空间应用，它具有抗辐照能力强的特点。背场工艺的开发成功，使得电池的地面效率达到了 17%。70 年代后期到 80 年代，绒面技术和表面钝化技术的使用使得太阳电池的效率逐步提高，太阳电池的效率从 18%逐步提高的 20%。90 年代局部背场技术使得太阳电池的效率达到了 24.5%，太阳电池的开路电压达到了 720mV。90 年代以前，推动太阳电池发展的主要动力是空间应用。进入新世纪以后，随着能源越来越受到重视，绿色能源正在逐步成为世界各国优先发展目标，地面应用的太阳电池越来越受到重视，地面光伏应用成为了太阳电池发展的主要动力。

2　硅太阳电池的基本结构及种类

2.1　硅太阳电池的基本结构

N/P 型常规太阳电池的基本结构如图 6.15-1 所示，主要由四个部分组成，分别为基体材料或称衬底，PN 结，上下电极和减反射层。

基体材料为硅单晶，可采用直拉法和区熔法获得。基体材料的电阻率对于制造太阳电池电池来讲，范围可以很宽，一般地，可选的电阻率为 1～3Ω·cm 和 7～12Ω·cm。硅单晶的晶向主要以〈111〉和〈100〉两种晶向为主，但要制造绒面太阳电池，必须采用〈100〉晶向的硅单晶材料。基体材料的少数载流子寿命或者扩散长度是硅单晶的重要参数，通常直拉法制造的高电阻率硅单晶少子寿命为 50μs 以上，低电阻率的少子寿命为 10～20μs。

PN 结是构成太阳电池的核心，因此制造太阳电池的关键是 PN 结的制备。PN 结的制备方法是在一块具有确定导电类型的基体材料尚在掺杂另一种不同导电类型的元素，形成一个势垒区。制备方法可以有多种，如扩散方法、离子注入法以及外延等。PN 结的特性直接太阳电池的电性能。通常通过控制扩散层表面的掺杂浓度和结深来控制 PN 结的质量。在太阳电池制造工艺过程中，通过测量扩散层的电阻（通常称为方块电阻 $R_{\square}$）来控制 PN 结的表面掺杂浓度，通过调整扩散温度、扩散时间和气体流量来控制结深。一般地，太阳电池的结深控制在 0.15～0.5μm，方块电阻 $R_{\square}$ 值控制在 50～150Ω/□。

在已经制备 PN 结的硅单芯片上，必须制备好上下电极，才能成为可以输出电能的器件。上下电极一般采用金属材料，对于 N/P 型结构的太阳电池，N 型区为电池的光照面，制作在其上的电极称为上电极，是电池输出的负极。与电池背面接触的电极成为下电极，是电池输出的正极。对于 P/N 型结构的太阳电池，情况正好相反，就不再赘述。太阳电池的正面是光照面，太阳电池上电极的设计既要考虑减少遮挡面积，又要考虑减少电极的串联电阻，一般地，上电极设计成栅状形式。上电极遮挡面积控制在整个光照面积的 3%～5%。下电极一般设计为全覆盖形式，只有少数特殊结构的电池采用栅状形式。

在太阳电池电极制备完成后，就成为了一个能够输出电功率的光电器件，但是它的光电转换效率不高，这是因为入射到硅表面的太阳光有约 1/3 被反射掉，为了减少光的反射损失，在光照面沉积一层或多层减反射膜，来提高电池对入射光的利用率。可以选择合适折射率的材料和工艺，实践证明，双层减反射膜可使入射光的反射减少到 5.7%，使太阳电池的短路电流和效率提高 35%～40%。

2.2　硅太阳电池的种类

经过几十年的发展，硅太阳电池电池的效率已经有了很大提高。随着设计、工艺和设备的改进与完善，出现了各种形式的太阳电池，下面介绍一下几种常见的硅太阳电池。

2.2.1　常规电池

采用浅结技术，结深控制在 0.15μm 左右，减小了表面复合，提高了电池的光谱响应。由于结浅，这种电池的方块电阻较大。因此在栅状电极设计时，增加栅线的数量以减小串联电阻。太阳电池的效率一般为 12%～14%，这种电池具有抗辐照特性好的优点。

2.2.2　背反射器电池

在常规电池的基础上，在硅衬底的背面制作一层光亮的金属反射层，然后再制作下电极，这种具有金属反射区层的电池就称为背反射器电池。该金属反射层将进入电池并透过衬底到达电池背面的光发射回去，进行再次利用，从而增加太阳电池的光生电流。

2.2.3　背场电池

在常规电池的基础上，用掺硼或掺铝的方法，在电池背面 P 型区的基础上，在形成一个 P+层，也就在电池的背面形成了一个 P/P+结，即形成了一个背电场。它的作用是使产生在基区背面的电子孔穴对加速向 PN 结方向扩散，从而提高了光生载流子的收集效率，特别是提高了长波部分的光谱响应，从而提高太阳电池的效率，背场电池的开路电压可以达到 620mV 以上，电池的效率可以达到 14%～15.5%。

2.2.4 绒面电池

绒面电池利用碱溶液对具有〈100〉晶向的硅单晶进行选择性化学腐蚀，使硅片表面腐蚀出许多致密的形似金字塔状的四面锥体，这种结构使入射光在各面上多次反射，增加进入硅片的机会，大大减小了光的反射损失，再通过钝化、背场技术等，电池的效率可以达到 17%～19%。

2.2.5 卷包电池

主要应用于空间的一种太阳电池，例如国际空间站目前使用的就有这种电池。它的特点是面积为 8cm×8cm，在电池上打四个孔，通过该孔将上电极引导到电池背面。背面的下电极也采取栅线形式。这种电池具有低的太阳吸收系数，有工作温度低的特点。当这种电池工作在低轨道时，它还可以吸收部分地球反射光，增加太阳电池的输出功率。

为了提高太阳电池的效率，研究人员进行许多提高效率优化结构的研究，主要的工作简述如下。

(1) 采用理想的陷光技术使得器件没有反射损失并获得最大的吸收。

(2) 最小的复合：避免 SRH 以及表面复合，只允许俄歇复合。

(3) 理想的电极接触：既没有阴影遮挡也没有串联电阻损失。

(4) 在衬底方面无输运损失：衬底的电流输运平滑最大程度地减小电压损失。

最理想的电池应该采用本征材料，以减小俄歇复合和自由电子的吸收，电池的厚度大约为 80μm 左右。

3 硅太阳电池的制造工艺简介

下面以地面太阳电池制造为例，介绍一下太阳电池的制造工艺。图 6.15-1 示出了目前最高效率的地面太阳电池的结构。采用的丝网印刷的方式制作电极、随机金字塔结构。当然效率更高的电池其电极为蒸镀方式获得，并且其陷光方式为均匀的倒金字塔结构，如图 6.15-2 所示。

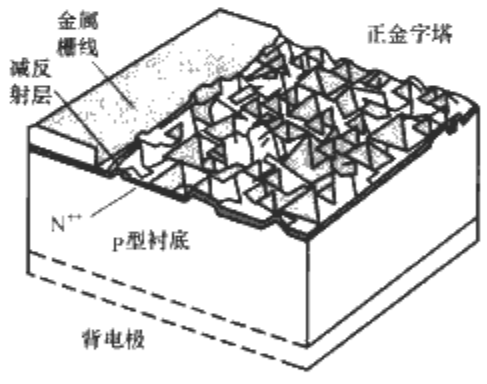


图 6.15-1 生产线制造的地面应用的高效太阳电池

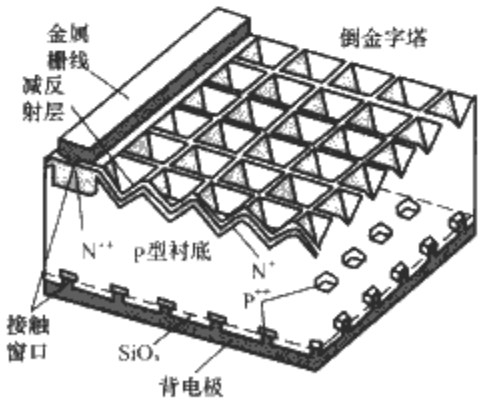


图 6.15-2 实验室制造的最高效率太阳电池

3.1 硅材料制备

太阳电池的制作跟一般的 IC 制作虽然是有部分的类似，但很多方面则是不同。标准的太阳电池制造首先是硅单晶的制造，通常有四种方法，包括直拉法（CZ）、区熔法（FZ）、Sheet 法以及 Ribbon 法。最高效率的太阳电池是用区熔法制造的材料获得的。

硅单晶的制造，最原始的材料是一种含二氧化硅（SiO_2）纯度相当高的石英岩砂。将它和一些含有碳的材料放在炉子里，其化学反应要经过数个步骤，总的表达式可表示为

$$SiO_2(s)+SiC(s)\longrightarrow Si(s)+SiO(g)+CO(g)$$

这个程序提炼出来的硅纯度约为 98%，称为冶炼级的硅。然后，硅被捣碎成粉末，和氯化氢（HCl）气体反应，形成氯硅烷（$SiHCl_3$）

$$Si(s)+3HCl(g)\xrightarrow{\sim 300℃}SiHCl(g)+H_2(g)$$

因为氯硅烷的沸点只有 32℃，在普通的室温下，它是液体。经过部分蒸馏法的处理，然后和氢气反应产生所谓电子级的硅

$$SiHCl(g)+H_2(g)\longrightarrow Si(s)+3HCl(g)$$

但为了节省成本，太阳电池是使用太阳电池级（SOG）硅，其纯度较电子级的硅为低，因为它省略了一些制造步骤。若是要制造单晶硅，接着就会使用直拉（CZ）法或区熔（FZ）法制造硅锭。然后硅锭再经线切割，就得到了芯片。一般而言，虽然 FZ 芯片的品质较佳，其制出的太阳电池效率也较高，但是因为其价钱较 CZ 芯片昂贵甚多，因此工业界一般还是采用 CZ 芯片。至于多晶硅的硅锭，通常则用铸造的方法制造。

3.2 衬底准备

作为衬底的硅单芯片的制作，是太阳电池制造的材料准备阶段。太阳电池的制造，必须在洁净的环境中进行。硅芯片的清洗是非常重要的步骤，清洗可以使用 IC 制作中的 RCA 清洗步骤，也可以使用较简易的方法，如使用氢氧化钠（NaOH）或氢氧化钾（KOH）溶液来清洗芯片。一般而言，芯片的清洗的效果取决于溶液的浓度、溶液加热反应的温度和反应的时间等。而所用的容器、外加氮气、去离子水、甚至处理放置芯片的过程，也有可能影响芯片的清洗的结果。

芯片清洗后，表面要做绒面化处理。这可以使用方向性刻蚀来完成。使用 NaOH 加异丙基醇（IPA）的溶液，就能够对硅芯片〈100〉表面进行方向性蚀刻，暴露出硅晶〈111〉的截面，产生金字塔形状的表面。一般而言，绒面处理的好坏主要取决于芯片的洁净度、NaOH 和 IPA 的浓度及其比例、溶液的温度和反应的时间。而所用的容器、IPA 挥发的程度、残余的硅酸钠也会影响绒面的结果。

在太阳电池制造过程中，材料寿命是非常重要的参数。在实验室中，有很多不同的方法用于提高或维持材料寿命，如在高温工艺中为了避免污染发生，通常保证炉子的清洁，采用高纯的化学试剂。在工业生产中，由于采用了含有缺陷的材料以及工业环境的洁净度问题，使得问题变得更复杂一些。对材料寿命的影响因素包括来自环境的污染、衬底含有的杂质和缺陷在高温下的相互影响和移动等等。解决的方法有采用一体化真空生产技术以减小污染的影响，尽量减少对材料的高温处理，使得材料的寿命达到 1～10μs。

衬底的厚度取决于材料的结构和质量，对于扩散长度较长的电池，最主要的问题是表面复合，薄的电池吸收较少的光子，这可以通过陷光结构来消除影响。一般地，衬底的厚

度达到 400μm 时，采用无陷光但有钝化发射结和局部背场扩散技术的电池的效率得到提高。但是因为降低成本，一般采用衬底厚度为 150～200μm 厚度的衬底。由于新技术和工艺的发展，如陷光技术和背面复合技术，使得太阳电池薄型化成为可能。

3.3　掺杂

硅太阳电池制备的一个主要步骤，就是使用扩散的方法，在硅芯片上，形成 PN 结。在实验室以及在工业上的高效率电池都是采用掺硼制得衬底，即衬底为 P 型硅芯片，在衬底上做 N 型磷扩散获得 PN 结。一般是使用 $POCl_3$ 加上氧气与氮气，在高温扩散炉管进行扩散。其化学反应式可表为

$$4POCl_3 + 3O_2 \longrightarrow 2P_2O_5 + 6Cl_2$$

$$2P_2O_5 + 5Si \longrightarrow 4P + 6SiO_2$$

产生的磷原子经由高温扩散的方式进入硅晶格内，形成 N 型的掺杂杂质。而硅单晶表面也产生一层 SiO_2。磷的浓度（由氮气携带气体的流量决定），氧气和氮气的流量，和其注入、作用、与关闭的时间与方式，炉管的温度随时间的控制等都会决定最终的扩散效果。而扩散结果，就决定了扩散层的深度、扩散层的方块电阻等。

最佳的掺杂取决于电池结构和主要的复合机理。尽管本征衬底表现出很好的低的俄歇复合，但是当 SRH 复合存在时高一些的掺杂更有利。高掺杂同样能够减小串联电阻，在生产中，衬底掺杂浓度一般为 $10^{16}\,cm^{-3}$。

硅单晶表面会和空气中和氧气或水汽作用，尤其是加热造成的热氧化，都会在表面形成二氧化硅。经过磷高温扩散后，一般都会使用氢氟酸（HF）来除去硅晶表面的 SiO_2，其化学反应为

$$SiO_2 + 6HF \longrightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$$

式中：H_2SiF_6 是可溶于水的。

经过扩散制作后，整个 P 型衬底便会被一层 N 型掺杂层覆盖。下一步就要经过边缘蚀刻的处理，将 N 型边缘除去，才能显现出 PN 结的结构。这通常是使用 CF_4 加上等离子体蚀刻。其结果则取决于芯片放置的方式、RF 的频率与功率、作用的时间、CF_4 和 O_2 气体的流量、与两者的成分比例。如果边缘刻蚀处理不完全，则太阳电池的旁路电阻便会减小，太阳电池的效率也因此减低。

3.4　减反射膜

减反射膜是一种薄的光学介质膜，采用相干原理来减少入射光的反射。当膜厚为入射光波长的四分之一的奇数倍时，可以最大程度减小反射。虽然此时其他波长光的发射大一些，但是总是小于没有减反射膜的情况。一般地，减反射膜的厚度设计为 600nm 左右，这是因为在此处的太阳光谱中光子剂量最大。

太阳电池的制作中，一般使用 PECVD 的方法，在芯片上镀上一层氮化硅（SiN）的减反射层镀膜（ARC）。PECVD 作用气体可以使用硅烷（SiH_4）和氨气（NH_3），其化学反应可以简单写成

$$SiH_4 + NH_3 \xrightarrow{\sim 300℃} SiN:H + 3H_2$$

也可以使用 SiH_4 和 N_2，则其化学反应可以简单写成

$$2SiH_4 + N_2 \xrightarrow{\sim 300℃} 2SiN:H + 3H_2$$

其中 SiN：H 是指 PECVD 成长的氮化硅实际上是一富含氢的非晶系结构。PECVD 的制作中，RF 的频率与功率、RF 输入腔体的电极之排列与间距，作用的时间、作用时的温度与总气压、作用气体的流量及其成份比例等等因素都会决定抗反射层镀膜的结果。而这结果就决定镀膜的组成、硅/氮比例、氢含量、折射系数、密度、介电常数、电阻、介电强度、禁带宽度、和应力。

其他膜系也被采用，如 TiO_x、SiO_x、ZnS 以及 MgF_2 等。

3.5　绒面及陷光结构

除非增加硅中的内部反射次数，否则长波光子在硅中很难被吸收，它们将透过硅衬底。陷光结构的作用就是使光在电池内部多次反射，最后达到被太阳电池吸收的从而产生光生载流子的目的。背反射器的作用和陷光结构的作用是一样的。具体的陷光结构见图 6.15-3。从图可以看出，光经过多次反射进入电池内部被电池吸收。陷光结构对于薄型太阳电池来讲非常重要。

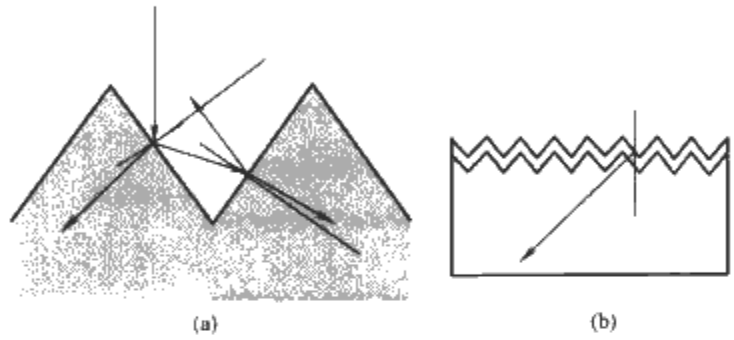


图 6.15-3　陷光结构

(a) 光线在电池表面反射示意图；(b) 在电池内部的光路

陷光结构一般为绒面结构，〈100〉晶向的芯片一般采用碱溶液腐蚀的方法来获得倒金字塔的绒面结构。绒面一般与减反射膜同时采用，可以使发射降低几个百分点。为了更好地控制金字塔的图形，一般采用光刻工艺。

3.6　电极

制作于上表面的金属电极用于收集分布式的光生载流子电流了，为了尽量减少电极对电池的遮挡并且减小串联电阻，一般采用窄而厚的高电导率的金属栅线形式的电极。

在实验室中，太阳电池金属电极的制作一般采用光刻及蒸镀的方法形成 10～15μm 的金属栅线。Ti/Pd/Ag 电极结构具有低接触电阻和高电导率的优点，但是不适合工业化以及较厚衬底的情况。因此在工业上一般使用丝网漏印加高温烘烤的方法制作，这种方法也比较简易，而且适合大量产的制作需求。该方法使用丝网漏印机将金属膏涂抹在芯片上，然后经过高温烘烤形成金属接触。当然，金属膏的成分与烘烤过程的温度控制自然是影响金属接触效果的最重要因素。除此之外，涂抹金属膏的方式，丝网漏印机器的调整，甚至烘烤时，芯片放置的方式与传送速率，也或多或少会影响金属接触的效果。粗糙的金属化工艺意味着遮挡阴影的增加和串联电阻的增大，将会影响太阳电池的效率。

在金属栅线下面的表面必须是重掺杂层，这种结构一方面可以减小接触电阻，另一方面也可以起到透明电极的作用。如果没有钝化层，这层做得越薄越好。如果有钝化层，需要在钝化层上刻蚀出槽以便金属栅线与重掺杂层直接接触。

背电极的制作和上电极的制作基本相同，需要注意的是背电极没有必要做成栅线形式，并且为了获得良好的欧姆接触，一般在衬底背面采用硼背场技术。为了获得更高的电池效率，局部背场技术已经得到了广泛的应用。

3.7 工艺过程

以上讲述了太阳电池各个组成部分的结构及制作方法。这里必须特别强调的是，每一个步骤并非是完全独立的，它们之间是互相关联的，这一点是在工业上生产太阳电池时必须考虑的。经验告诉我们，若每一个步骤都是独立的正确，可以生产出一般效率的电池，但是若所有步骤都是关联的正确，才能生产出高效率的电池。在工业界的制作上，而这往往也是决定是否能生产高效率太阳电池的关键因素。图 6.15-4 示出硅太阳电池的基本制造工艺流程，供参考。

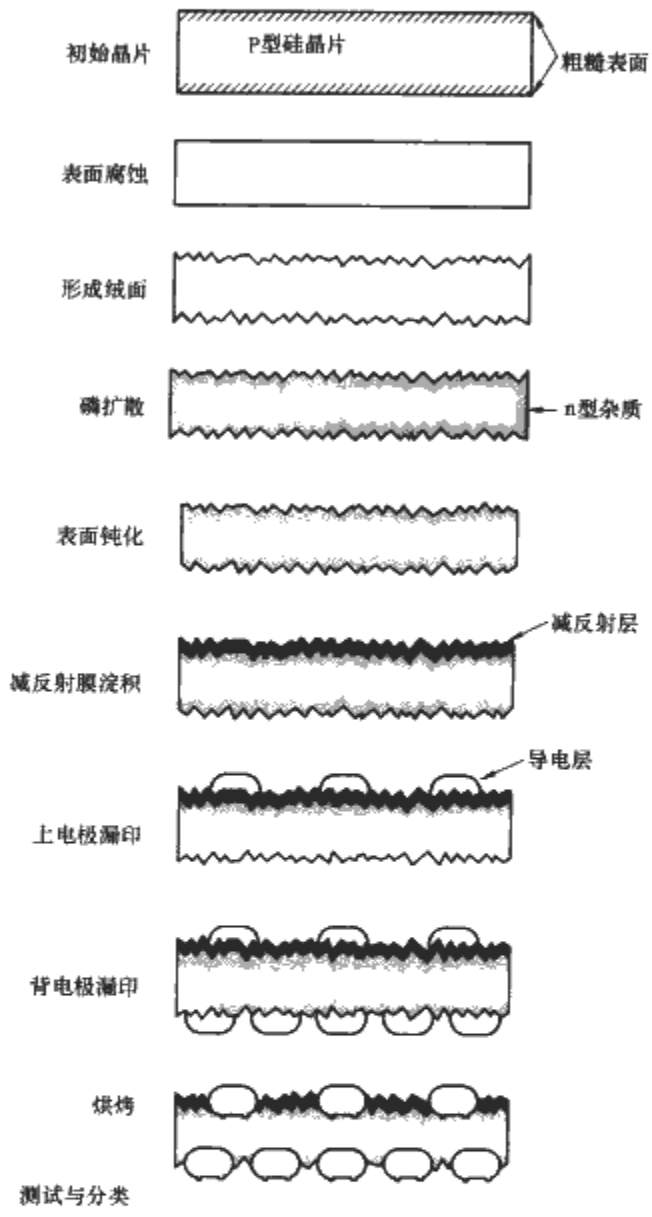


图 6.15-4 硅太阳电池的制造工艺流程

3.8 薄型太阳电池简介

由于硅是间接带隙半导体材料，一般认为硅衬底的厚度必须大于吸收系数（α，当 $\lambda=1.05\mu m$ 时）的倒数，才能吸收全部的有用光。可以计算出 $\alpha^{-1}=700\mu m$。对于硅材料来讲，这是相当厚的。如果使用这么厚的材料制造太阳电池，就会遇到经济上和技术上两个问题。在经济上，成本会很高。在技术上，由于相对于这样的厚度少子的扩散长度比较短，要收集光生载流子变得非常困难。因此在实践中，通常衬底的厚度要小得多。如前所述，减薄电池将会减少吸收，从而减小了光生电流。对于平面工艺的电池，光生电流密度与电池厚度的关系可以表示为图 6.15-5。

由上图可见当电池厚度为 300μm 时，其电流密度约比 700μm 时小 5%，因此一般选择厚度为 300μm 厚度的衬底制造太阳电池。采用减薄衬底的一个优点是能够减少半导体材料体内复合，因此减薄电池的厚度可以提高电池的开路电压

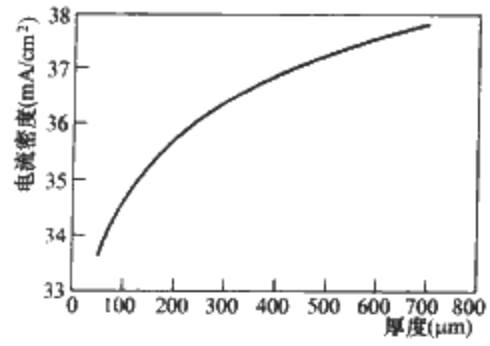


图 6.15-5 光生电流密度与电池厚度的关系

和填充因子。图 6.15-6 示出了开路电压和衬底厚度之间的关系，当然电池厚度减薄后，其表面复合将成为主要的因素。当表面复合速率减小到 100cm/s 时，开路电压将明显增大。

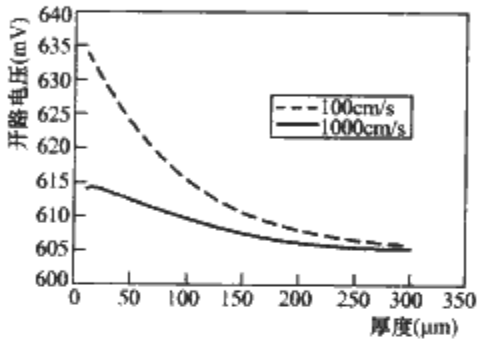


图 6.15-6 开路电压和衬底厚度之间的关系

目前技术人员已经研制出了厚度为 47μm，光电转换效率达到 21.5%的硅太阳电池。其结构见图 6.15-7。

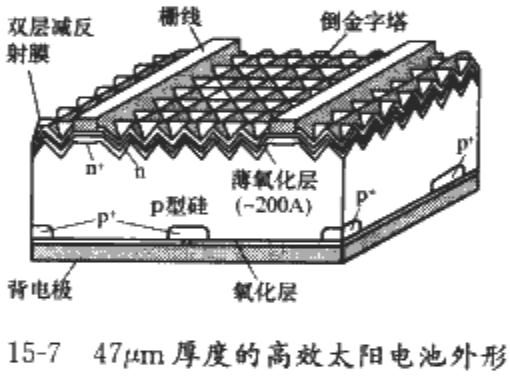


图 6.15-7 47μm 厚度的高效太阳电池外形图

为了降低成本，研究人员也在研究采用多晶硅材料或非硅材料作为衬底。在设计薄型太阳电池时，必须注意以下几点：

（1）优化陷光结构以增加光子在电池中的光路长度。

（2）最佳化减反射膜的设计减少光的反射。

（3）减少材料的缺陷，尤其是表面复合中心。

4 硅太阳电池的基本特性

4.1 伏安特性

短路电流、开路电压、转换效率和填充因子是评价和判断光照时太阳电池性能好坏的 4 个主要参数。为了迅速而又正确地判断太阳电池的好坏，可以通过测试太阳电池的伏安特性曲线来了解这些参数。图 6.15-8 示出了硅太阳电池的典型伏安曲线，表 6.15-1 列出了典型硅太阳电池几个重要参数的数值。

表 6.15-1 太阳电池的典型参数

参 数	数值	单位
短路电流 J_{sc}	39.2	mA/cm^2
最佳工作点电流 J_{mp}	36.8	mA/cm^2
最佳工作点电压 V_{mp}	0.490	V
最佳工作点功率 P_{mp}	18	mW/cm^2

续表

参数	数值	单位
开路电压 V_{oc}	0.585	V
填充因子 FF	0.79	
效率 η	13.3%	

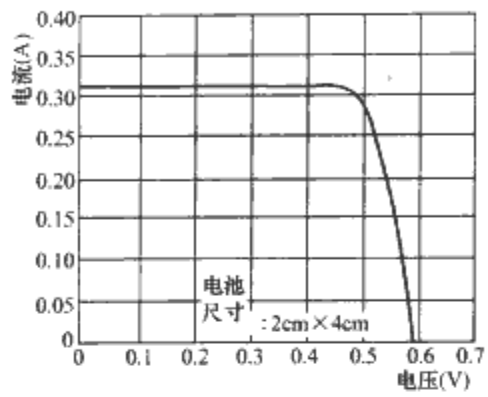


图 6.15-8　硅太阳电池的典型伏安曲线

4.2　光谱响应特性

光谱响应特性表明电池队由太阳光谱中各种不同波长的光产生的光伏效应的灵敏度，太阳电池对各种不同波长的单色光，在相同的辐照度下，单位面积所产生的光电流密度是不同的。太阳电池的短路电流与入射光波长相关的这种特性称为太阳电池光谱响应。不同的太阳电池其光谱响应是不同的，下图示出了常规太阳电池的典型光谱响应曲线。从图 6.15-9 中可以看出，光谱响应的波长范围在 0.40～1.10μm 之间，响应峰值为 0.80～0.90μm。由于太阳光谱分布范围为 0.20～3.0μm 之间，因此硅太阳电池光谱响应波段只占太阳光谱分布中很小的一部分。

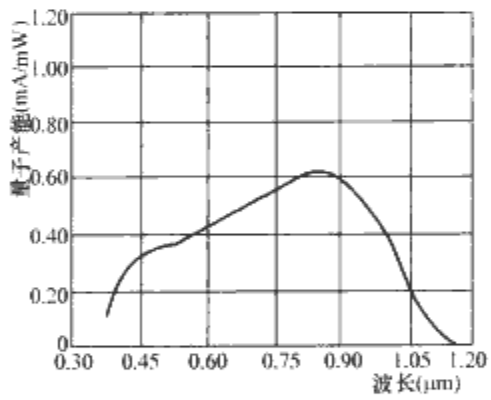


图 6.15-9　常规硅太阳电池的光谱响应

4.3　光电转换效率

光电转换效率是太阳电池最重要的指标之一，太阳电池的光电转换效率是指在一定的光照条件下，电池输出的最大功率与垂直入射到电池光照面的的光功率之比。各种硅太阳电池的典型效率是不同的。表 6.15-2 列出了各种硅太阳电池的效率值。

表 6.15-2　　各种硅太阳电池的效率

材　料	实际效率（%）	材　料	实际效率（%）
常规电池	12.3	绒面电池	18
背场电池	15	卷包电池	14.8

综上所述，影响太阳电池效率的主要因素有光损失，复合损失，电压因子损失以及串并联电阻上功率的损失。

4.4　温度特性

太阳电池对温度的变化相当敏感，因此太阳电池阵的设计者不仅需要了解温度对太阳电池性能的影响，更应该准确知道太阳电池参数随温度变化的具体数值。

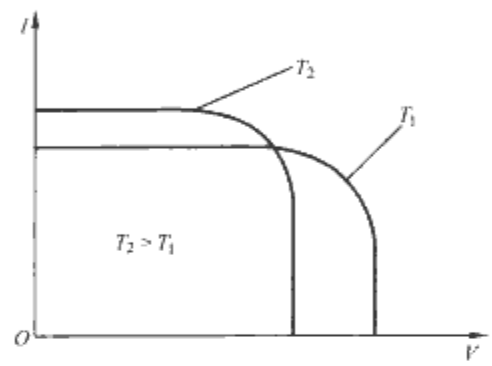


图 6.15-10　太阳电池伏安特性曲线随温度变化情况

温度对太阳电池性能的影响表现在太阳电池伏安特性曲线随温度变化而产生的变化，如图 6.15-10 所示。当太阳电池的工作温度升高时，伏安特性曲线沿纵坐标（即电流轴）向上移动，沿横坐标向左移动。曲线拐点处圆弧度变软。这些变化表明，短路电流随温度的升高而略有增加，开路电压岁温度升高而明显减小，填充因子明显变差，其结果是太阳电池的效率或输出功率岁温度升高而下降。表现为太阳电池的负功率系数。表 6.15-3 列出了典型硅太阳电池的开路电压、短路电流和最大功率输出点的主要参数的温度系数。

表 6.15-3　　典型硅太阳电池温度系数

结　构	dV_{oc}/dT (mV/℃)	dI_{sc}/dT [mA/(cm² · ℃)]	$(dP_{max}/P_{max})/dT$(%/℃)
常规电池	−2.4	0.02	−0.46

第 16 章 砷化镓太阳电池

1 砷化镓太阳电池的发展简史

在过去的四十多年里，太阳电池领域主要以硅太阳电池为主，但是近十年来，由于新技术、新设备的涌现，砷化镓太阳电池正在占领越来越大的市场。

砷化镓太阳电池的发展基于新技术、新设备的出现，在 20 世纪 80 年代，由于液相外延技术和设备的开发成功，出现了以液相外延技术研制的砷化镓太阳电池，这种太阳电池结构上的主要特点是在 GaAs 表面外延 GaAs 的 PN 结，之后再外延一薄层 AlGaAs 窗口层，以降低表面复合速率，使太阳电池的效率得以提高。但是由于液相外延有着诸多的局限性，包括其外延原理为物理过程，难以实现薄层和多层生长，不能进行异质外延等，目前几乎没有人再继续进行这方面的研究工作。80 年代末期，MOVPE 技术和设备开发成功，使得技术人员既能在 GaAs 上制作太阳电池，也能在 Ge 上制作太阳电池。GaAs/GaAs 太阳电池的效率达到了 19.6%以上，但是由于 GaAs 衬底机械强度较低，不宜制作成薄型大面积的太阳电池，因此限制了这种太阳电池的发展。

Ge 衬底具有机械强度高，同时它的晶格常数与 GaAs 材料非常接近，参看图 6.16-1。并且他们的热膨胀系数也基本相同，因此技术人员开始尝试使用 Ge 衬底来替代 GaAs 衬底。

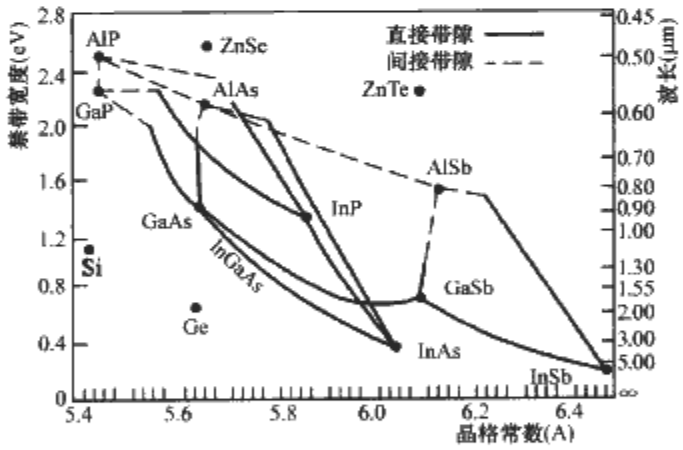


图 6.16-1 半导体材料能带与晶格常数关系图

使用 Ge 衬底还具有以下几个优点：

(1) Ge 比 GaAs 价廉。

(2) Ge 可以减薄厚度，制成大面积的太阳电池。

(3) Ge 的禁带宽度为 0.66eV，在多结电池中可以制作的底电池。

因此，研究人员开始注重对这种电池进行研究，20 世纪 80 年代末 90 年代初期美国光谱实验室最先研制出了光电转换效率达到 18%以上的 GaAs/Ge 太阳电池，90 年代中期，研制出了光电效率达到 23%的 GaInP/GaAs/Ge 双结太阳电池，在世纪之交，研制出了光电转换效率达到 25%以上的 GaInP/GaAs/Ge 三结砷化镓太阳电池，之后，经过设计、工艺创新、改进和优化，研制出了效率达到 29%以上的 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池。与此同时欧洲的砷化镓太阳电池研究也紧随其后，相继研制出了以上几种高效率的太阳电池。

2 砷化镓太阳电池的基本结构及种类

目前单结以及多结砷化镓/锗太阳电池已经开始大规模生产，其生产设备主要是金属有机物气相沉积设备 MOCVD 设备，当然分子束外延设备（MBE）也可以进行砷化镓/锗太阳电池的制造。MOCVD 设备主要是完成太阳电池的主要部分 P/N 结层、缓冲层、窗口层以及多结电池的隧穿结等的沉积，其使用的原材料主要包括三甲基镓、三甲基铟、砷烷、磷烷以及高纯度的氢气。掺杂物质包括硒化氢、硅烷、二乙基锌和四氯化碳等。

砷化镓/锗太阳电池之所以能够制作成一体化的太阳电池，主要是因为它的各个组成部分具有很好的晶格匹配，可以通过普通的异质结外延工艺完成各个层的生长，因此我们可以完成太阳电池的制造，下面首先简单介绍一下单结、双结和三结砷化镓太阳电池的基本结构，然后再详细介绍太阳电池的制作工艺及制作过程。

2.1 单结砷化镓太阳电池

一般地，单结砷化镓太阳电池为 P/N 型结构，如图 6.16-2 所示。

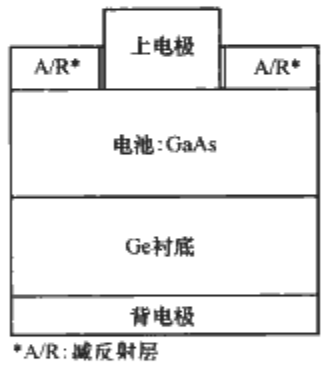


图 6.16-2 单结砷化镓/锗太阳电池示意图

该种电池采用 MOCVD 方式，在锗衬底上首先外延缓冲层，该层的作用是弥补晶格失配，这样在随后的过程中生长出晶体质量良好的砷化镓 N 区和 P 区，其上再生长窗口层。在完成了外延工艺后，在进行上下电极和减反射膜的制作。这样制作的 GaAs/Ge 电池中最简单的单结电池。该种电池的开路电压一般为 1V 左右，电流为 33mA/cm^2 左右，效率为 19%左右。

2.2 双结砷化镓太阳电池

双结砷化镓太阳电池为 P/N 型或 N/P 型结构，如图 6.16-3 所示。

同样这种电池也是采用 MOCVD 的方式进行各层的生长，不再赘述。需要注意的是在生长完 GaAs P/N 结后，要进行隧穿结的生长，然后再在其上再外延生长 $GaInP_2$ P/N 结。隧穿结的作用是连接两个电池，由于其串联电阻很小，因此可以提高整个电池的输出电压。该种太阳电池的开路电压一般为 2.2V 左右，电流为 16mA 左右，效率一般为 23%左右。

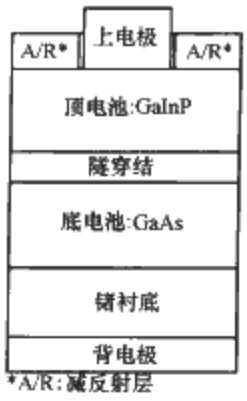


图 6.16-3　双结砷化镓/锗太阳电池示意图

2.3　三结砷化镓太阳电池

三结砷化镓太阳电池可以是 P/N 型，也可以是 N/P 型，目前普遍以 N/P 型作为研究的主攻方向。其结构如图 6.16-4 所示。



图 6.16-4　三结砷化镓/锗太阳电池示意图

同样这种电池也是采用 MOCVD 的方式进行各层的生长，不再赘述。在双结太阳电池的基础上，增加了底电池即锗电池的制作，同时增加了一个隧穿结。这种电池的开路电压一般为 2.5～2.7V，短路电流为 16.5mA 左右。效率范围为 25%～29%之间，这主要取决于太阳电池的工艺。

3　三结砷化镓太阳电池的组成

上节简述了几种砷化镓太阳电池的基本情况，由于三结砷化镓电池包含了前面两种太阳电池的全部生产工艺，因此这里叙述一下三结太阳电池各组成部分及制作工艺。图 6.16-5 示出了典型 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的构成。

3.1　GaInP 太阳电池

3.1.1　掺杂

制作 GaInP 一般采用 Se、Si 元素作为杂质，以获得 n 型区。一般地，采用 H_2Se 作为掺杂源。在很多生长条件下，随着 H_2Se 流量和分压的增加，其电子浓度也相应增加，饱和浓度大约为 $2\times10^{19}/cm^3$，当然这和生长温度有一定的关系，Se 的掺杂浓度也和磷烷（对于 GaInP）或者砷烷（对于 GaAs）有关。当电子浓度大于 $2\times10^{18}/cm^3$ 以后，GaInP 的禁带宽度增加，其有序度下降。

P 型区杂质一般为锌、镁和碳。以掺锌为例，掺杂源为二甲基锌或二乙基锌。其掺杂浓度与流量、生长温度有关，一般地，当载流子浓度为 $1\times10^{18}/cm^3$ 时，GaInP 的有序度就下降，因而增加其禁带宽度。但是较高的载流子浓度会影响 Ga、In 比，这样会影响电池的性能。在外延过程中锌的扩散也会降低太阳电池的电性能，分析认为，在衬底、背场和隧穿结的锌会扩散到 N ON P 电池的基区，从而形成点缺陷，影响太阳电池的性能。

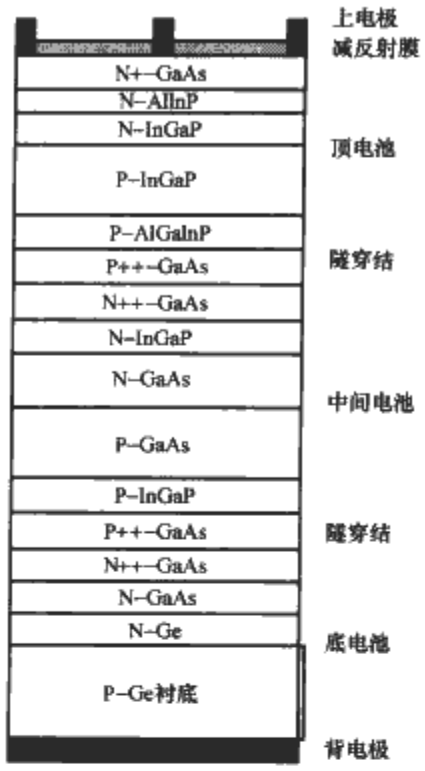


图 6.16-5　典型三结砷化镓电池结构

3.1.2　窗口层

窗口层对发射区表面起钝化作用。发射区的表面态表现为少子陷阱，产生表面复合。在 GaInP 表面制作一层 AlInP 可以大大降低 GaInP 表面的复合作用。AlInP 窗口层的禁带宽度为 2.34eV，一般地，该窗口层制作成 N 型，这可以通过掺杂 Si 或者 Se 做到。在制作窗口层时应特别注意反映室内不能够被水蒸气或其他氧化物污染。

3.1.3　背场

背场的作用是钝化顶电池和隧穿结之间的界面。研究表明，采用 AlGaInP 或者 AlInP 背场能够制作出良好的电池。

3.2　GaAs 电池

3.2.1　掺杂

可以采用与制作 GaInP 电池相同的掺杂技术制作 GaAs 电池的 P 型区及 N 型区，这里不再赘述。

3.2.2　窗口层与背场

对于 GaAs 电池，GaInP 和 AlInP 都可以制作成优良的窗口层和背场，理论上，AlInP 更佳，但是由于它对氧非常敏感，因此很难制作的非常理想，因此在实际研究中还是以 GaInP 制作的窗口层与背场质量更好。

3.3　锗电池

通过掺杂五族和三族元素可以形成 Ge 电池的 PN 结，由于外延过程是一个高温过程，因此，在实际制作过程中，Ge 衬底中不可避免地扩散进五族及三族元素。因此，我们要研究的是如何控制这个过程以期获得性能优良的 Ge 电池，同时还要制作出无缺陷的异质的 GaAs 外延层。在制作过程中应注意以下几点：掺杂物质的扩散常数与温度的高低密切相关，因此在进行掺杂时要严格控制温度，同时要了解各种物质的固溶度；Ge 电池的短路电流远远高于另外两个电池的短路电流，因此在制作电池时更应该关注电池的开路电压，它和 Ge 与 GaAs 界面质量的好坏有相当大的关系；砷烷对锗有腐蚀作用，因此应尽量避免锗衬底长时间暴露在砷烷环境下，而磷烷是一个更好的选择。

3.4 异质结

在 Ge 衬底上制作 GaAs 有许多方法，但是由于设备的不同以及材料纯度的关系，在制作异质结时，可能要进行反复试验才能够制作出质量优良的异质结。各个研究机构的报道也不尽相同，但是一般认为，砷在储表面的排列的方式和均匀性对异质结的质量有很大影响。

3.5 隧穿结

隧穿结位于两个子电池之间，是连接两个电池的桥梁。隧穿结提供一个低电阻通路。没有隧穿结，两个 PN 结之间就又形成了一个反向的 PN 结，当太阳光照射时，该 PN 结会产生一个与另外两个 PN 结极性相反的电压，从而抵消太阳电池的输出。隧穿结是一个简单的高掺杂的 PN 结，它的空间电荷区很窄，只有 10nm 左右，只要稍有一个正偏压，由于隧道效应电流就能够穿过 PN 结，因此当电流密度小于一定值时，隧穿结的 *IV* 特性非常像一个电阻。这个值一般称为最大隧道电流。最大隧道电流必须远远大于光照时太阳电池的短路电流。隧穿结一般通过掺杂 C 或者 Se 来获得，它们具有相当高的稳定性，在进行其他的外延工艺时，不会对隧穿结产生负面影响。隧穿结可以是 GaAs PN 结，也可以是 AlGaAs/GaInP PN 结。研究表明，P^{++} AlGaAs/N^{++} GaInP 异质结具有非常好的稳定性，并且其最大隧道电流可以达到 80A/cm² 以上。

4 MOCVD 设备

单结和多结砷化镓太阳电池的制造要归功于 MOCVD 设备，如果没有这种设备，是不可能制造出这种电池的，更谈不上大规模生产。至于其他工序的设备如用于电极、减反射膜制造的真空镀膜系统、光刻系统等与但晶硅太阳电池制造设备类似，这里不再介绍。

砷化镓/锗太阳电池的制造一般在大型的 MOCVD 设备上进行，目前主要是美国 VEECO 公司和德国的 AIXTRON 公司制造这种设备。虽然在 MBE 设备上也能够制造出这种电池，但是无论从效率还是产能上讲，都不能和 MOCVD 设备相提并论。MOCVD 设备主要由反应室、装片室、氢气提纯器、各种源、气路管路、真空泵、尾气处理系统等组成。其主体是反应室。不同管路分别连接各种源，通过高纯氢气携带将三甲基镓 TMG、三甲基铟、砷烷、磷烷等输运到反应室，同时进入反应室的还有掺杂源如 H_2Se、Si_2H_6、二乙基锌 DEZ 以及 CCl_4。图 6.16-6 为 MOCVD 设备反应室的照片。

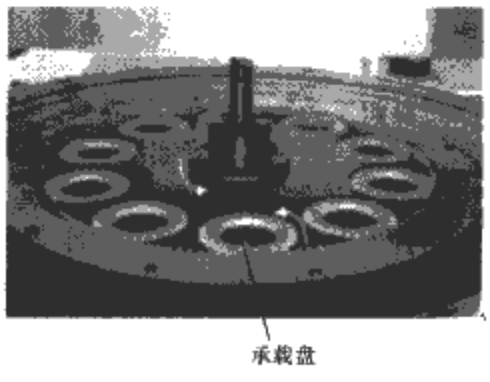


图 6.16-6 MOCVD 设备反应室

5 砷化镓太阳电池的基本特性

这里列举一些电池的基本特性，只是做一些叙述性的说明，让大家对砷化镓电池有一个感性认识。

5.1 伏安特性

表 6.16-1 列出了典型单结砷化镓太阳电池的电性能参数，图 6.16-7 示出了典型的单结砷化镓电池的伏安特性。

表 6.16-1 典型单结砷化镓太阳电池的电性能参数

参 数	数 值	单 位
短路电流 J_{sc}	30.5	mA/cm²
最佳工作点电流 J_{mp}	28.6	mA/cm²
最佳工作点电压 V_{mp}	0.900	V
最佳工作点功率 P_{mp}	25.7	mW/cm²
开路电压 V_{oc}	1.025	V
填充因子 FF	0.82	
效率 η	19.0%	

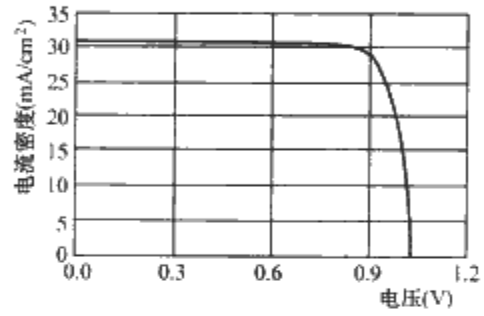


图 6.16-7 典型单结砷化镓电池的伏安特性

表 6.16-2 列出了典型三结砷化镓太阳电池的电性能参数，图 6.16-8 示出了典型的三结砷化镓电池的伏安特性。

表 6.16-2 典型三结砷化镓太阳电池的电性能参数

参 数	数 值	单 位
短路电流 J_{sc}	16.9	mA/cm²
最佳工作点电流 J_{mp}	16.0	mA/cm²
最佳工作点电压 V_{mp}	2.27	V
最佳工作点功率 P_{mp}	36.32	mW/cm²
开路电压 V_{oc})	2.565	V
填充因子 FF	0.84	
效率 η	26.8%	

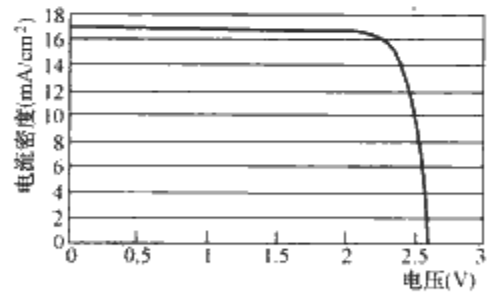


图 6.16-8 典型的三结砷化镓电池的伏安特性

5.2 光谱响应特性

图 6.16-9 示出了典型的单结砷化镓电池的光谱响应曲线。

图 6.16-10 示出了典型的多结砷化镓电池的光谱响应曲线。

5.3 太阳电池效率

各种砷化镓太阳电池的典型效率是不同的。表 6.16-3 列出了各种硅太阳电池的效率值。

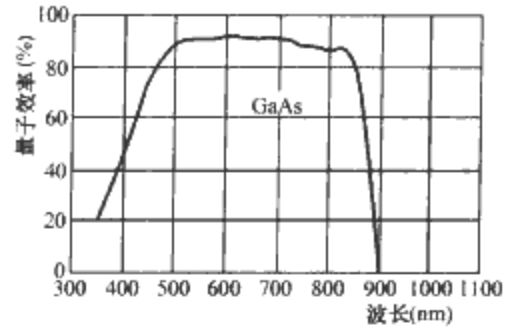


图 6.16-9　典型单结砷化镓电池的光谱响应曲线

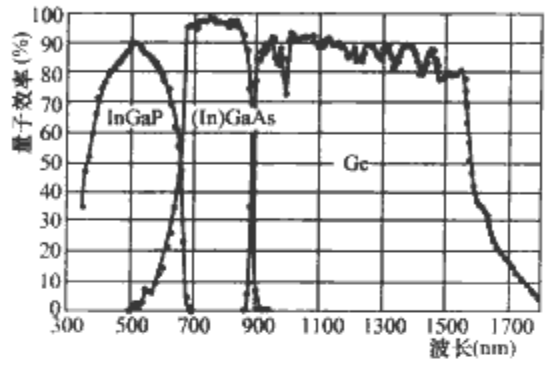


图 6.16-10　典型多结砷化镓电池的光谱响应曲线

表 6.16-3　　各种砷化镓太阳电池的效率

电池类型	实际效率	电池类型	实际效率
单　结	19%	三　结	26%
双　结	23%		

5.4　温度特性

与硅太阳电池类似，砷化镓太阳电池对温度的变化也同样敏感，表 6.16-4 列出了典型砷化镓太阳电池的开路电压、短路电流和最大功率输出点的主要参数的温度系数。

表 6.16-4　　典型砷化镓太阳电池温度系数

结　构	dV_{oc}/dT (mV/℃)	dI_{sc}/dT [mA/(cm² · ℃)]	$(dP_{max}/P_{max})/dT$(%/℃)
单结电池	−1.9	0.02	−0.23
双结电池	−4.8	0.008	−0.24
三结电池	−6.5	0.008	−0.27

第 17 章 薄膜太阳电池

本章将涉及非晶硅太阳电池、碲化镉太阳电池和铜铟(镓)硒，内容包括电池的发展历史，基本结构，工艺简介以及电池的基本性能参数。

1 非晶硅薄膜电池

1.1 发展简史

薄膜电池的发展最早还是要追溯到晶体太阳电池的发展，由于晶体半导体如硅和砷化镓价格昂贵，在地面应用方面受到了很大限制，因此工程技术人员开始寻找价格低廉的材料来研制太阳电池。

大约在 1973 年，在苏格兰的敦提，Walter 和 Peter 等发现，采用硅烷制备的非晶硅具有很好的电子特性。1975 年，在制作非晶硅薄膜时，发现在沉积薄膜时，若在硅烷中同时混合加入磷烷或者乙硼烷能够显著增加非晶硅的导电性能。正如单晶硅太阳电池一样。1974 年，David Carlson 采用硅烷沉积的薄膜的方法制作出了效率为 2.4%的非晶硅太阳电池。1997 年，他和 Wronski 报道了效率大于 14.6%的非晶硅太阳电池，改种电池是采用辉光放电方法制备的。图 6.17-1 示出了最初制备的 2.4%电池和 1997 年制备的电池伏安特性曲线。

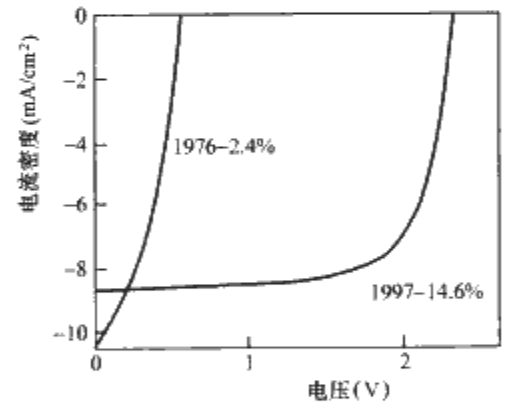


图 6.17-1 效率分别为 2.4%和 14.6%非晶硅电池伏安特性曲线

制备非晶硅太阳电池的方法简单、廉价，并且非晶硅的光学特性非常适合于制作太阳电池。

1.2 电池结构

非晶硅太阳电池中的基本光电二极管结构是三层 PIN 或者 NIP 结构，这三层由非常薄的 P 型层（约 20nm），非常厚的非掺杂的本征区 I 型层（约几百纳米），以及一个非常薄的 N 型层组成。这个结构中，N 型层中的电子扩散到 P 型层，在两层中分别形成了正带电区和负带电区，从而产生了一个可见的内建电场（这个内建电场通常大于 10^4V/cm）。当光子流穿过 P 型层时几乎没有吸收，P 型层仿佛是一个透明窗口，光子几乎全部在很厚的本征层被吸收，每个被吸收的光子将要产生一对电子和空穴的光生载流子，光生载流子被内建电场分开分别进入 N 型层和 P 型层，从而产生了光电流。由于非晶硅材料不需要晶格匹配，并且起禁带宽度可以通过掺杂进行调整，因此非晶硅太阳电池电池可以制作成叠层结构。如图 6.17-2 所示。

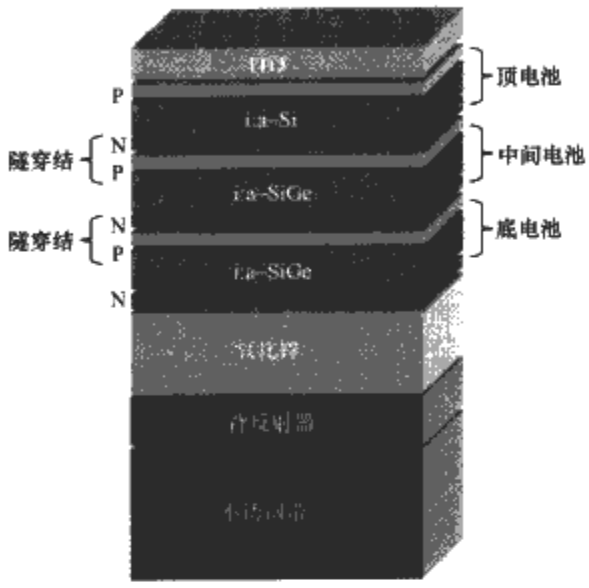


图 6.17-2 叠层结构非晶硅太阳电池

该图显示的是一个目前最高效率的 a-Si(1.8eV)/a-SiGe(1.6eV)/a-SiGe(1.4eV)三结太阳电池，下面简单介绍一下其工艺过程。

1.3 工艺过程

(1) 不锈钢衬底。首先是金属背反射层通过溅射或者蒸镀的方法沉积在不锈钢上，紧接着采用溅射的方法沉积氧化锌缓冲层。在研究时为了获得高效率，通常采用银作为反射层，在大规模生产时一般采用铝作为反射层。金属层的沉积温度大约为 300～400℃。此后，采用 RF PECVD 设备沉积半导体层。首先沉积最下面的 NIP 电池，其中本征层为 a-SiGe，其禁带宽度约为 1.17～1.5eV，然后是中间的 nip 电池，其中本征层为 a-SiGe，其禁带宽度为 1.6～1.65eV，最后是顶部的 a-Si 电池，其中本征层为 a-Si，其禁带宽度为 1.8～1.85eV。可以采用低温高纯氢稀释的方法制作本征层。通过蒸发或溅射的方法在顶电池上制作氧化铟锡(ITO)膜，其厚度大约为 70nm，其作用有二，其一是作为上电极，其二是起减反射的作用。在 ITO 膜上采用蒸发或溅射的方法再制作金属栅线以便减小接触电阻。

(2) 玻璃衬底。首先在玻璃衬底上沉积氧化锡或氧化锌，当然其沉积方法有很多，比如可以采用常压 CVD 的方法。紧接着制作 PIN 顶电池，然后是中间电池最后是底电池。最后是沉积氧化锌缓冲层和金属反射层。

在制作三结电池时，需要注意以下几点：第一，电流的匹配。因为是三个电池串联形成一个只有两极的整体叠层电池，具有最小电流的电池将决定整个电池输出电流的大小。因此，每个子电池在最佳工作点处的电流要匹配。而短路电流只是一个参考。这里底电池一般具有较低的填充因子而顶电池具有较高的填充因子，因此制作的底电池的短路电流应稍大于中间电池的短路电流，而中间电池的短路电流应稍大于顶电池的短路电流。一般要高 0.5～1mA/cm²。可以通过调整各个电池本征层的禁带宽度和厚度来获得最佳的电流匹配。第二，隧道二极管。和三结砷化镓电池类似，隧道二极

管是连接两个相邻电池的。研究发现，对于非晶硅材料，当进行掺杂时会产生许多悬挂键，根据量子力学隧道效应，被缺陷俘获的载流子很容易从 PN 结的一面传输到另一面。对于非晶硅电池产生的电流其隧道二极管已经具备了足够的能力来进行输运。只有制作出一定高掺杂浓度的 PN 结，其悬挂键的数目能够提供足够的复合。隧道二极管与电池是反向连接的，因此它必须具有非常小的可以忽略的开路电压、电阻以及非常小的光吸收。

1.4　电池性能

1.4.1　*I—V* 曲线

测量多结电池的 *I—V* 曲线，需要非常关注入射光的光谱。在不同光源下进行测量一个电流匹配的电池，其测量结果可能有很大不同。比如使用钨灯可能测出电池的性能非常差。

1.4.2　光谱响应

在测量三结电池的量子效率时，应施加适当的光偏置和电偏置。图 6.17-3 示出了三结电池的光谱响应曲线。

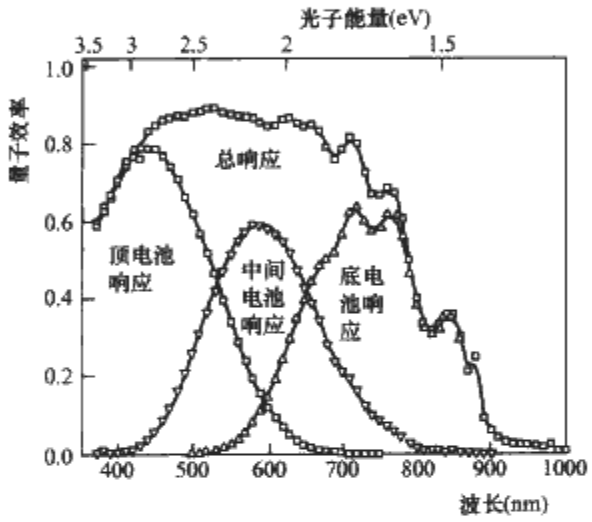


图 6.17-3　非晶硅三结电池的光谱响应曲线

1.4.3　电池效率

表 6.17-1 列出了不同公司制造的三结电池的效率，一般地，三结电池的光致衰降为 10%～20%，而单结电池为 20%～40%。

表 6.17-1　　不同公司制造的三结电池的效率

结　构	初始效率 η（%）	稳定效率 η（%）	公　司
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	15.2	13.0	United Solar
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	11.7	11.0	Fuji
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	12.5	10.7	U. Toledo
a-Si/a-SiGe/a-SiGe		10.2	Sharp
a-Si/a-SiGe	11.6	10.6	BP Solar
a-Si/a-SiGe		10.6	Sanyo
a-Si/μc-Si		12.0	U. Neuchatel
a-Si/μc-Si	13.0	11.5	Canon
a-Si/poly-Si/poly-Si	12.3	11.5	Kaneka
a-Si/a-SiGe/μc-Si	11.4	10.7	ECD
a-Si/a-SiGe		12.4	United Solar

2　CIS 电池

2.1　发展简史

Bell 实验室早在 1970 年代就开始了 CIS 太阳电池的研究工作，采用在 P 型单晶 CIS 上蒸镀 N 型 CdS 的方法制作该种太阳电池。当时制作的薄膜是为了优化当时的硅太阳电池。在一个晴朗的天气测量到的电池效率达到了 12%。由于 CIS 本身良好的内在本质，研究人员开始采用各种方法制作 CIS/CdS 太阳电池。1981 年波音公司最早制作出了效率达到 9.4%的电池。目前世界上有 10 多家公司制作出了较高效率的基于 CIS 的太阳电池，这些电池基本上都采用同样的基本电池结构，即在钼背电极上制作 CuInGaSe/CdS 结。从 20 世纪 80 年代到 90 年代，很多企业都在致力于这种电池的商业开发，但是始终没有获得令人满意的效果。随着新技术、新工艺的出现，如共蒸法、硒化法等的出现，到目前为止，太阳电池的效率已经有了很大的提高。目前 CIGS 电池的最高效率已经达到的 19%以上。同时，许多公司正在致力于大规模生产的开发工作，如 Shell Solar 目前已经开始生产 5W、10W、20W、40W 等不同规格的组件，德国的 Würth Solar 采用目前最先进的工艺方法共蒸法制作出了大面积的效率达到 12%以上的电池，在美国，EPV、ISET、GSE 等在研究“卷到卷”的工艺。在日本，Showa Shell、Matsushita 采用硒化和共蒸工艺。这些公司目前都在进行批量生产的开发工作。

但是 CIS 电池的制造工艺远比晶体电池和非晶硅太阳电池复杂，所以要获得令人满意的效果，还必须经过不懈的努力才能达到。

2.2　电池结构

尽管制造 CIS 电池有着各种各样的工艺方法，但是电池的基本结构基本是相同的。它们都是围绕着基本的电池结构即 Cu（InGa）Se_2/CdS 结以及 Mo 背面接触层来制造太阳电池的，图 6.17-4 示出了基于玻璃衬底的 CIS 太阳电池。该电池采用碳酸盐玻璃作为衬底，在其上溅射一层 Mo 层作为背面接触层，然后沉积 Cu(InGa)Se_2，再采用化学沉积的方法制作 CdS 层，形成 Cu(InGa)Se_2/CdS 结。上面再通过溅射或 CVD 方法沉积高阻和高电导率的 ZnO 层，最后再制作电极栅线。

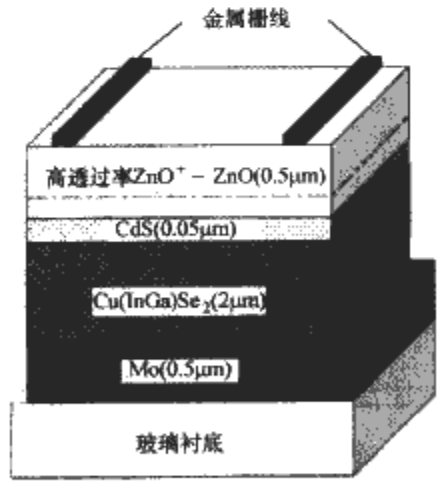


图 6.17-4　基于玻璃衬底的 CIS 太阳电池

2.3　工艺过程

对于 CIS 电池的制作，主要着重 Cu(InGa)Se_2 薄膜的制作，目前有各种沉积 Cu(InGa)Se_2 薄膜的方法，最普遍采用

的为共蒸法和两步法。下面从衬底、Mo 层、CIS、CdS、ZnO 直到最后上电极形成分别进行介绍。

2.3.1 衬底

作为衬底，影响薄膜性能的因素主要有三种，一是热膨胀系数；二是化学影响；三是表面对成核的影响。

碳酸盐玻璃，也就是我们使用的普通玻璃，由于其价格低廉，并且能够制造出性能较好的太阳电池，因而被用于太阳电池的制造，在沉积 $Cu(InGa)Se_2$ 层时，衬底温度至少要达到 350℃以上，实验表明，制作的最高效率的太阳电池其衬底温度一般为 550℃左右。玻璃的热膨胀系数为 $9\times10^{-6}K^{-1}$，与 $Cu(InGa)Se_2$ 薄膜具有很好的匹配。玻璃中含有 Na_2O、K_2O 和 CaO 等各种氧化物，在工艺过程中，可以扩散到 Mo 和 $Cu(InGa)Se_2$ 中，对电池的性能有很好的影响。当然，对于 Na 的掺杂，最佳的方法还是专门提供 Na 源，可以通过在玻璃上蒸镀 SiO_x 或 Al_2O_3 来阻止 Na 从玻璃中向 Mo 和 $Cu(InGa)Se_2$ 薄膜扩散。可以通过在 Mo 层上直接沉积一层含 Na 的源层来直接为 $Cu(InGa)Se_2$ 提供 Na。当然商业上的玻璃可能有各种缺陷从而直接影响电池的质量。硼硅酸盐玻璃、一些金属膜以及 PI 膜都可以作为衬底使用。

2.3.2 背电极

一般采用直流溅射的方法制作 Mo 背电极，其厚度一般取决于电池和组件结构对电阻的要求。为了制作出高效率的太阳电池，必须采用 Mo 电极。电极的厚度为 1μm 时，其方块电阻为 0.1～0.2Ω/□。采用溅射方法沉积 Mo 层一定要注意压力的控制以便控制膜层的应力，防止出现牢固度问题。在沉积 $Cu(InGa)Se_2$ 时，在界面会形成 $MoSe_2$ 层，该层的多少取决于 Mo 层的致密性。$MoSe_2$ 层对于太阳电池的电性能没有多大的影响。目前，除了 Mo 之外，其他金属还没有成功的先例。

2.3.3 Cu（InGa）Se_2 层的制造

最高效率的电池是采用共蒸法制作的。

图 6.17-5 示出了共蒸法系统的简图。该工艺采用努森隙透坩埚或开放舟放置 Cu、In、Ga 和 Se，采用蒸镀方式直接蒸镀到衬底上。每个源的蒸发温度可以根据各种源本身的物理性质而确定，一般地，Cu 的蒸发温度范围是 1300～1400℃，In 为 1000～1100℃，Ga 为 1150～1250℃，Se 的蒸发温度为 300～350℃。

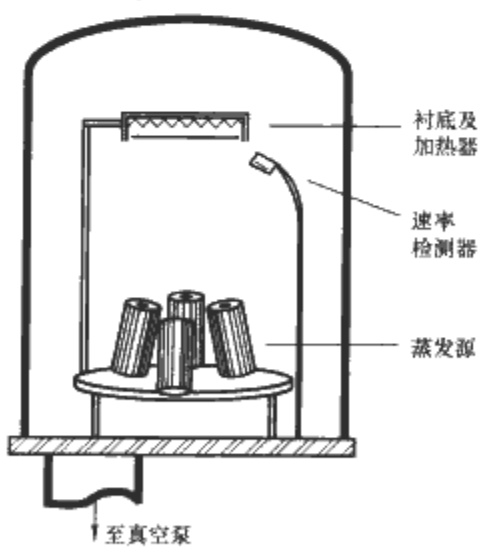


图 6.17-5 共蒸法系统简图

Cu、In、Ga 的黏着系数都很高，所以其沉积和生长速率只和蒸发量有关。膜的最终成分根据 Cu 相对于 In 和 Ga 的浓度而形成处于 $(InGa)_2Se_3$ 和 Cu_2Se 之间的物质。而 In、Ga 的浓度又决定了禁带宽度。在整个沉积过程中，流量的调节能够改变膜的组成。Se 具有较高的蒸汽压和较低的黏着系数，所以在蒸镀过程中必须增加它的流量。不同的工艺条件对于膜的组成以及电池的性能都有着很大的影响，对于形成的膜的质量的分析，可以使用在线测量膜厚方法、光谱分析方法、X 射线感应荧光方法等进行分析。共蒸法的优点是可以选择各种工艺参数来控制膜的形成、组成和禁带宽度。其缺点是不易控制，特别是对 Cu 源的控制，需要改进沉积、诊断和控制工艺。目前还不能够大型的共蒸设备，也不具备进行大规模生产的条件。

两步法，一般也称为硒化法，对于初始层目前已经有许多工艺方法。例如采用溅射、热阻或电子束蒸发、电沉积、丝网漏印以及纳米技术都可以应用于 Cu、In、Se 等初始层的沉积。除了对单质金属进行沉积外，也可以对 Se 的二元化合物采用电沉积的方法制作初始层，随后进行硒化工艺。硒化过程如下：初始层在 400～500℃下，在 H_2Se 或 Se 蒸气环境下，经过 30～60min 的反应形成最佳器件质量材料。H_2Se 为有毒气体，因此在操作中要注意安全。之后为快速热处理。

前面提到的两步法没有涉及到 Ga 的掺杂。研究表明，Ga 无论放在 Cu、In、Se 的哪一层的位置，最终都会积聚在 Mo 层附近，形成 $CuInSe_2/CuGaSe_2$ 结构，因此器件仍然表现为 $CuInSe_2$ 的性质，此时太阳电池的开路电压不能得到提高。虽然 Ga 的掺入可以提高二者之间的牢固度。可以采用 600℃1h 退火的方法增加 Ga 与 In 之间的相互扩散来提高电池的性能，也可以采用加入 S 的方法获得高的开路电压。

当然 $CuInSe_2$ 层的制作还有其他工艺方法，如反应溅射法、化学槽沉积法、激光蒸发法等。

2.3.4 结及器件的形成

试验表明，最高效率的 CIS 电池是异质结电池，其结的组成是 P 型的 $CuInSe_2$ 单晶和 N 型的 CdS 薄膜。目前普遍采用的制作 CdS 层的方法是化学槽沉积方法。化学槽沉积方法可以理解为在液体情况下的 CVD 方法，也可以认为是溶液生长。这种方法特别适合于硫族元素，如 PbS、CdS、CdSe 等。CdS 层在碱性水溶液（pH>9）中制造。碱性水溶液一般包含镉盐、配位剂以及含硫的物质。$Cu(InGa)Se_2$ 薄膜放入盛有溶液的槽中，温度控制在 60～80℃，放置几分钟。实际上，化学槽方法一般在实验室中采用，设备、操作简单易行，形成的膜的结构均匀，一般包含几十纳米晶胞尺寸的微晶，如图 6.17-6 所示。

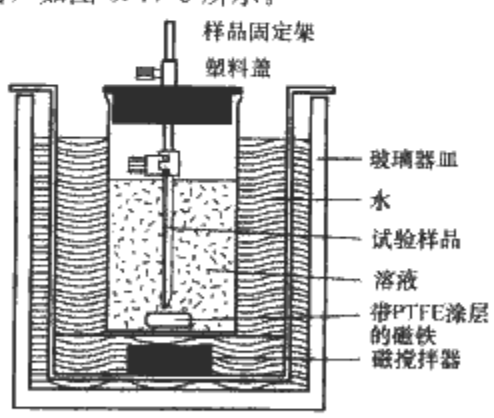


图 6.17-6 制备 CdS 的化学槽

研究人员也采用其他方法进行 CdS 层的生长，如真空蒸镀或溅射的方法等。由于这些方法可能造成膜的不均匀，所以到目前为止还没有制造出较高效率的电池。研究人员也在研究采用原子层化学气相沉积（ALCVD）的方法生长 CdS 层，这种方法正准备应用于另外一种Ⅱ-Ⅵ族化合物的沉积。目前研究人员也在寻找一种能够替代 Cd 材料层或者

直接在上沉积 ZnO。

为了获得高的透光率和良好的欧姆接触，在 CdS 层上面要制作一层透明导电层。一般采用掺杂 ZnO。可以采用溅射、蒸镀、CVD 等方法进行生长。

在制作透明导电层之前，一般先制作一层高阻 ZnO，其电阻率一般为 1～100Ω·cm。前面提到的低阻 ZnO 的电阻率一般为 10^{-17}～10^{-3}Ω·cm。该层的作用是减少 CdS 层产生的针孔及界面损伤等缺陷，提高整体性能。

最后在 ZnO 表面沉积金属以实现电极引出。其制作方法和其他电池的上电极引出基本相同。

2.4　电池性能

很显然，$Cu(InGa)Se_2$ 电池具有很高的光电转换效率，随着研究的深入、科学和技术知识进一步积累，电池可以进一步优化。有理由相信这种电池的光电转换效率将会大于 20%。目前这种电池的短路电流可以达到 35.2mA/cm²（AM1.5）。在制作过程中，通过调整参数可以制造各种禁带宽度的 $Cu(InGa)Se_2$ 电池，图 6.17-7 和图 6.17-8 分别示出了几种不同禁带宽度电池的 I—V 曲线及其光谱响应曲线。

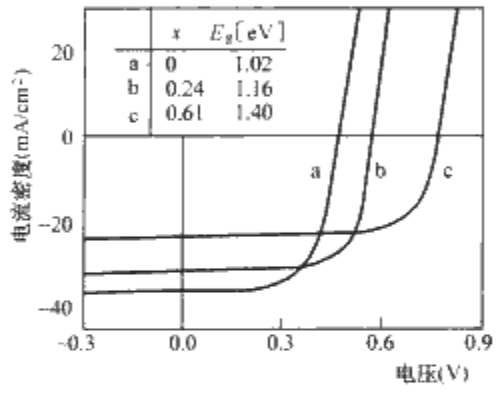


图 6.17-7　几种不同禁带宽度电池的 I—V 曲线

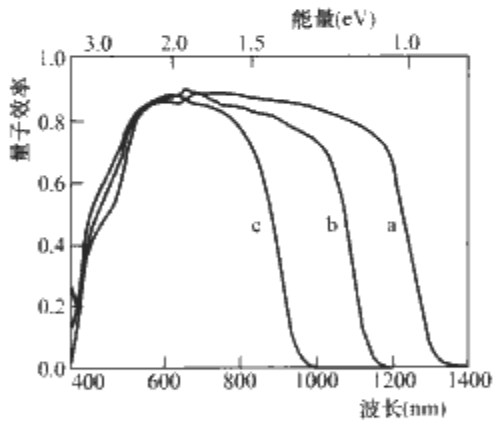


图 6.17-8　几种不同禁带宽度电池光谱响应曲线

3　CdTe 电池

3.1　发展简史

早在 1956 年，RCA 的 Loferski 首先提出采用 CdTe 来制作太阳电池。尽管 CdTe 晶体的 N 型和 P 型导电材料的制作方法在 1960 年就已经开发出来，但是只是限于同质结的研究。1959 年，同样是 RCA 的 Rappaport 验证了同质结 CdTe 电池的效率为 2%，其开路电压为 600mV，短路电流为 4.5mA/cm²，填充因子为 55%。1979 年法国的 CNRS 研制出了效率达到 7%的太阳电池，不久又报道了效率达到 10.5%的太阳电池。除了同质结电池的研究，研究人员也在探讨异质结电池的研究，早在 20 世纪 60 年代，类似于 CdS/Cu_2S 结构的 N-CdTe/P-Cu_2Te 结构的电池就已经有人在进行研究。70 年代早期，Justi 研制的这种电池的效率达到了 7%以上。随后各种结构的 CdTe 电池如肖特基类型、电镀薄膜类型等形式的太阳电池相继出现，最高效率达到了 9%。高效率的 CdTe/CdS 太阳电池制作工艺在 80 年代以后被开发，90 年代这种电池的效率达到了 16%以上。目前在众多的 CdTe 太阳电池中，覆盖多晶薄膜的 CdTe/CdS 太阳电池由于其较高的转换效率受到了众多关注，这种太阳电池的转换效率已经接近 19%。

但是 CdTe 电池的制造工艺远比晶体电池和非晶硅太阳电池复杂，所以要获得令人满意的效果，还必须经过不懈的努力才能达到。

3.2　电池结构

太阳电池的上覆盖层为玻璃，它具有双重作用，一方面作为电池的支撑保护电池，另一方面可以使太阳光入射到吸收层。窗口层的作用尽量使入射光进入到吸收层，减少反射。另外，该层是重掺杂，它不吸收光子并且减少串联电阻。吸收层吸收光子产生电流。电极用于将产生的电流输运到外电路。如图 6.17-9 所示。当然也可以采用玻璃、金属或 PI 作为衬底，这样电池的上覆盖层可以采用光学膜或半导体膜。

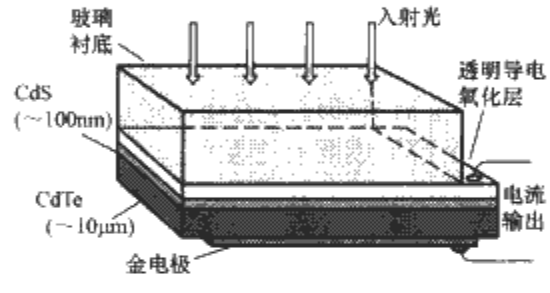


图 6.17-9　CdTe 太阳电池基本结构

3.3　工艺过程

目前，几乎所有高效率的 CdTe 电池都采用上覆盖层结构，而衬底结构的太阳电池，如 TCO/CdS/CdTe 沉积在不透明衬底上，由于其 CdS/CdTe 结的质量很差并且 CdTe 的欧姆接触很差，因此很少做出质量好的太阳电池。图 6.17-10 示出了太阳电池的各层结构，并对各层作一简要介绍。

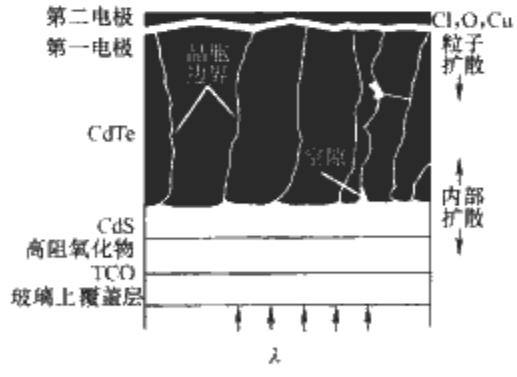


图 6.17-10　CdTe 太阳电池的各层结构

3.3.1　窗口层

制作 CdTe 太阳电池的第一步是在玻璃覆盖层上制作一层透明导电的氧化物（TCO），如 SnO_2、ITO、锡酸镉等作为上电极接触。第二层为高阻透明的氧化物，位于 TCO 和 CdS 之间，被称为 HRT，使用的材料可以是 SnO_2、In_2O_3、Ga_2O_3、Zn_2SnO_4 等。该层的作用如同在 CIS 电池和非晶硅电池起的作用一样，提高结的质量和均匀性。CdS 窗口层一般紧邻 CdTe 层，该层的制作可以根据 CdTe 的制作工艺进行改变，以使之适应 CdTe 层。为了获得较高的电流密度，CdS 层需要制作得很薄。工艺方法包括化学槽沉积、溅射沉

积以及物理气相沉积等。在实际电池制作中，工艺 CdTe 和 CdS 之间会有相互扩散，导致 CdS 禁带宽度变化，从而影响窗口层的透过率降低短波量子效率，可以采用加入 $CdCl_2$ 方法使薄膜再结晶来消除影响。也可以采用掺 ZnS 的方法来增加禁带宽度。

3.3.2 CdTe 吸收层

制作品质优良的 CdTe 吸收层的方法有很多，包括密闭空间生化方法、气体输运沉积法、物理气相沉积法、溅射沉积法、电化学沉积法、MOCVD 沉积法、喷溅沉积法以及丝网漏印方法等。但是在制作过程中发现，无氯的沉积方法如物理气相沉积如果没有后续的 $CdCl_2$ 处理工艺，即在 400℃下暴露在含氯物质和氧气氛围中时，太阳电池的效率水平会大大降低。氯的加入及之后的热处理能够改善晶胞的生长及再结晶。后处理可以减小 CdTe 的表面电阻。对于电池的影响就是增加短路电流和开路电压。

3.3.3 CdS/CdTe 的结合

在进行 $CdCl_2$ 处理时，CdS/CdTe 整个电池单元都处于 350℃的环境中，因此 CdTe 和 CdS 之间可能发生化学反应并且这会导致 CdTe 和 CdS 之间的相互扩散。通常在 $CdCl_2$ 处理过程中，会形成 $CdTe_{1-x}S_x$ 小以及 $CdS_{1-x}Te_x$ 合金。扩散到 CdS 的 CdTe 会降低 CdS 的透过率，但是生长 CdTe 之前对 CdS 的热处理能够增加 CdS 的晶胞尺寸和密度从而轻了由于 CdTe 的扩散造成的对透过率降低的影响。CdS 向 CdTe 的扩散是一个更快的过程更难控制，特别是对于超薄的电池结构。合金的形成既有有益的一面也有有害的一面，首先相互扩散式的吸收层的禁带宽度变窄，提高了长波方面的量子效率，尽管这个收益被内建电压的降低部分地补偿掉了，但其效率仍然是提高了。相互扩散还降低了界面存在的应力，并且能够减小暗复合电流。CdS 层的厚度减薄了，这也提高了其透过率。但是 CdS 的不均匀性增加了。

3.3.4 背电极

背电极由两部分组成，第一电极和第二电极。第一电极直接与 CdTe 接触，其组成成分为含碲的 P^+ 面，第二电极是电流输运的导体。当金属与其他 P 型半导体相比结合时，很容易形成肖特基势垒，因此要形成一个低阻的欧姆接触还是一个挑战。通过化学腐蚀及添加铜或含铜物质的办法获得一个富碲层。铜与碲反应形成 P^+ 层，该层能够与金属或石墨接触形成欧姆接触。除了选择铜之外，还可以选择 ZnTe:N 以及 Sb_2Te_3，可以和 CdTe 接触并于合适的金属层形成欧姆接触。

3.4 电池性能

目前，因为受到复合及较低的载流子浓度的影响，CdTe 电池的开路电压和填充因子受到了限制。从理论上讲，CdTe 太阳电池的禁带宽度与 GaAs 太阳电池基本相同，因此其效率应该和 GaAs 电池不相上下。但是目前 CdTe 电池的效率只有 GaAs 的 80%。图 6.17-11 和图 6.17-12 分别示出了 CdTe 太阳电池典型的伏安特性曲线和光谱响应曲线。

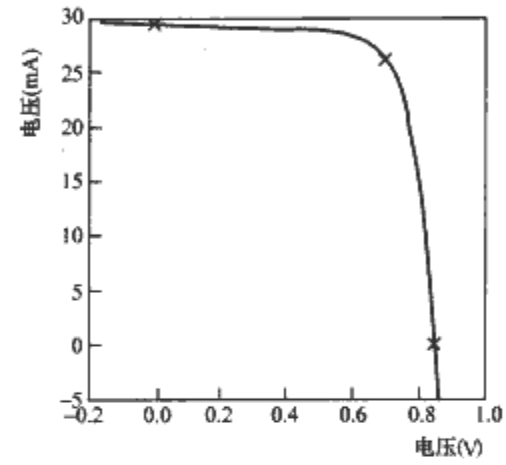


图 6.17-11 CdTe 太阳电池典型的伏安特性曲线

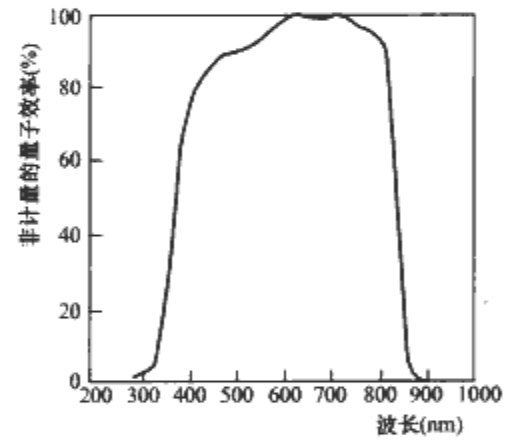


图 6.17-12 CdTe 太阳电池典型光谱响应曲线

第 18 章　温 差 发 电 器

1　温差发电器的特点及应用

1.1　温差发电器的特点

温差发电器是利用塞贝克效应，将热能直接转换成电能的一种发电器件。温差发电器是一种静态的固体器件，没有转动部件，它体积小、寿命长，工作时无噪声，而且无须维护。

特别是放射性同位素温差发电器（Radioisotope Thermoelectric Generator，RTG）结构紧凑、可靠性高、抗辐照性能好，与迄今已知的其他化学和物理电源相比，它的质量比能量高、寿命长，且不需维护、也不受环境影响。尤其是它能够在极低的环境温度下工作（例如零下一百多度），更是其他化学和物理电源无法比拟的。它的缺点是效率低（目前低于 10%）、成本高（主要因放射性同位素价格昂贵）。现在，RTG 已在空间、地面、海洋及医学的特殊任务中获得了应用，在某些场合（如月球表面和深太空）它是目前的首选电源。

1.2　温差发电器的分类

按使用的热源分类，温差发电器可分为放射性同位素温差发电器、核反应堆温差发电器、烃燃料温差发电器、低级热温差发电器等。

放射性同位素温差发电器（RTG）是将放射性同位素（如 Pu—238，Sr—90，Po—210 等）的衰变热直接转换成电能的温差发电器。

核反应堆温差发电器是将原子能反应堆中燃料裂变产生的热直接转换成电能的温差发电器。

烃燃料温差发电器，燃烧气体烃燃料或液体烃燃料产生的热量直接转换成电能的温差发电器。

低级热温差发电器，将各种形式的低温热能（包括余热、废热）直接转换成电能的温差发电器。

按工作温度来分类，温差发电器可分为高温温差发电器、中温温差发电器和低温温差发电器三大类。高温温差发电器，其热面工作温度一般在 700℃以上，使用的典型温差电材料是硅锗合金（SiGe）；中温温差发电器，其热面工作温度一般在 400～700℃，使用的典型温差电材料是碲化铅（PbTe）；低温温差发电器，其热面工作温度一般在 400℃以下，使用的典型温差电材料是碲化铋（Bi_2Te_3）。

1.3　温差发电器的应用

美国自 1961 年起在 20 多项空间任务中使用同位素温差发电器做电源。这些同位素温差发电器的输出电功率从 2.7W 到 300W，质量从 2kg 到 34kg，最高效率已达 6.7%，最高质量比功率已达 5.2W/kg，设计寿命为 5 年以上。例如著名的阿波罗登月计划、飞向外层行星的旅游者、海盗号火星着陆器、伽利略飞船等都使用了同位素温差发电器。1997 年 10 月，美国成功地发射了探测土星的卡西尼行星际飞船，有 3 个同位素温差发电器作电源。2006 年 1 月，发射了探测冥王星的新地平线号飞船，用 1 个 RTG 作电源。目前，这些同位素温差发电器的使用寿命都超过 19 年，有的已经工作 30 多年。

同位素温差发电器在地面和海洋开发中应用也日益增多。现已使用的同位素温差发电器功率范围在几毫瓦到数百瓦、上千瓦。主要用于灯塔、航标、海底声纳、海底微波中继站、自动气象站和地震测试站电源。

美军研制了前沿阵地使用的机动性高、无声、质量轻、能无人维护长期运行的液体燃料温差发电器，供夜视装置、雷达、导航设备、电台和指挥系统使用。这种发电器可使用柴油、汽油等多种液体燃料，功率从几十瓦到 1kW，可便携或可作车载辅助电源。加拿大环球温差电公司生产的燃气温差发电器已经在世界许多国家的输油、输气管线、通信网络上获得了应用。

在低级热利用方面，温差发电器也很有前途。低级热，包括工业废热、垃圾燃烧热、汽车排气管的余热、太阳热、地热、海洋热能等，热源的温度范围宽广。采用温差发电技术大规模利用低级热，可以开发出结构简单、维护少，而且是无公害的干净能源。很多专家认为，温差发电器利用这些热能，可直接产生低压大电流，如电解水制氢，是最好的低峰储能方式之一。

2　温差发电基本理论

2.1　温差电效应

2.1.1　塞贝克效应

如图 6.18-1 所示，在两种不同的半导体（或导体）构成的开路电路中，如果两个接头具有不同的温度 T_h 和 T_c，则在串入电路中的电压表上可测得电动势，这称为温差电动势。对于确定的材料，塞贝克系数定义为

$$\alpha_{12} = \frac{dU_{12}}{dT} \tag{6.18-1}$$

α_{12} 被称为两种材料的相对塞贝克系数。像图 6.18-1 中这样的电路称为温差电偶。对于给定的两个材料 1 与 2，α_{12} 的数值是与温差电偶所处的温度范围有关的，在某些场合，温度改变时甚至会改变 α_{12} 的符号。

曾经规定，以金属铅与低温超导体构成电偶的塞贝克系数作为铅的绝对塞贝克系数。任何其他材料的塞贝克系数便

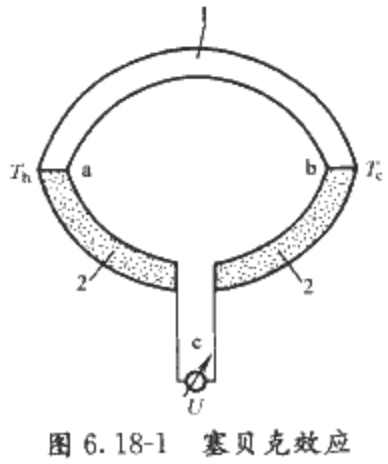


图 6.18-1　塞贝克效应

与铅构成电偶来加以定义。

塞贝克效应是可逆的。当温差相反时，温差电动势也将反一个方向，而大小不变。

通常制造温差电装置的两种材料分别采用 P 型和 N 型半导体。我们用 α_P、α_N 分别表示 P 型和 N 型半导体材料的绝对塞贝克系数，而用 α_{PN} 表示其相对塞贝克系数。α_{PN} 与 α_P、α_N 的关系是

$$\alpha_{PN} = \alpha_P + |\alpha_N| \tag{6.18-2}$$

此式表示，有 P 型和 N 型材料构成的单体其总的温差电动势可以是两部分温差电动势绝对值之和。

2.1.2 珀尔帖效应

珀尔帖效应是一个和塞贝克效应相反的现象。当电流通过不同的导体构成的回路时，在接头处除了要放出焦耳热（即电阻产生的损耗）外，还将放出或吸收某一热量。这一热量称为珀尔帖热。

如图 6.18-2 所示，如果电偶是由 P 型和 N 型半导体构成，则在电流由 N 型流向 P 型的那个接头时将吸收热，因而该接头是冷接头；反之，电流由 P 型流向 N 型的接头是热接头。实验表明，单位时间接头处所吸（放）的珀尔帖热是与外加电源所提供的电流强度成正比，即

$$P = \pi_{PN} I \tag{6.18-3}$$

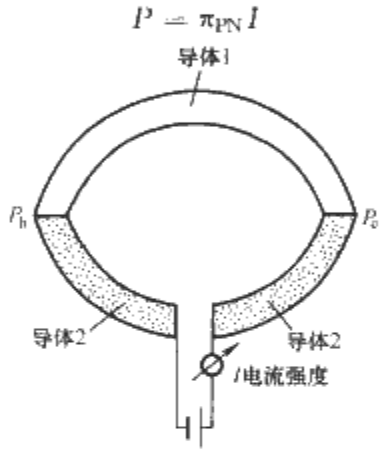


图 6.18-2 珀尔帖效应

式中：比例系数与这两种半导体材料的性质有关，称为珀尔帖系数。珀尔帖效应也是可逆的。即如果把电流方向反过来，则原来吸热的（冷）接头变为放热，原来放热的（热）接头变为吸热。用公式来表示这种可逆性，即为

$$P = -\pi_{NP} I \tag{6.18-4}$$

比较式（6.18-3）和式（6.18-4）有

$$\pi_{PN} = -\pi_{NP} \tag{6.18-5}$$

该式表示电流从 N 流向 P 时，单位时间单位电流强度所吸收的热量，与电流从 P 流向 N 时所放出的热量相等。负号则表示在该接头上前者为吸热，后者为放热。

珀尔帖系数是温度的函数。所以温度不同的接头，吸收或放出的热量不同。

2.1.3 汤姆逊效应

当电流通过存在温度梯度的导体时，导体中除了发生焦耳热外，还将发生或吸收某一热量，即汤姆逊热。实验证明，单位时间内所吸收（或放出）的汤姆逊热与导体原来的温差 ΔT 及电流 I 成正比，即

$$P = \tau \Delta T I \tag{6.18-6}$$

式中：比例系数 τ 称为该导体的汤姆逊系数。

塞贝克效应和珀尔帖效应都是包含两种不同性质的材料相接触构成电偶时发生的，都与界面处的材料性质和温度有关，与电偶的其余部分的情况则无关。而汤姆逊效应则是发生在均匀材料中。因此，一种材料的汤姆逊系数不需要相对别的材料来定义。

汤姆逊效应也是一种可逆效应。如果保持 ΔT 不变，而将电流 I 反向，那么假如原来是吸热的话，这时便将放热，放出的热量与原来吸收的热量相等。

2.1.4 汤姆逊关系

汤姆逊把热力学第一定律和第二定律应用于三个温差电效应，从而得出 α、π、τ 三个系数之间的两个重要关系式。它们是

$$\pi_{12} = \alpha_{12} T \tag{6.18-7}$$

$$\tau_1 - \tau_2 = T \frac{d\alpha_{12}}{dT} \tag{6.18-8}$$

由式（6.18-7）可知，一个电偶的塞贝克效应比较强，则珀尔帖应也比较强。由式（6.18-8）可知，汤姆逊系数是由塞贝克系数随温度的变化率决定的。也就是说，汤姆逊效应是塞贝克效应（或珀尔帖效应）的一种微分效应。

2.2 温差发电原理

将一个 P 型温差电元件和一个 N 型温差电元件在热端用金属导体电极连接起来，在其冷端分别用电极连接，就构成一个温差电偶，也称温差电单偶。如图 6.18-3 所示，在温差电偶开路端接入电阻为 r_L 的外负荷，如果温差电偶的热面流入热流，在温差电偶热端和冷端之间建立了温差，则将会有电流流经电路，负荷上将得到电功率 $I^2 r_L$，因而得到了热能直接转换为电能的发电器。当发电器工作时，为保持热接头和冷接头之间有一定的温度差，应不断地对热接头供热，而从冷接头不断排热。热接头所供给的部分热量被作为珀尔帖热吸收了，另一部分则通过热传导传向冷接头。排出的热量应为冷接头放出的珀尔帖热和从热接头传导来的热量之和。对于上述接头的热平衡，还应加上汤姆逊热和被导体释放的焦耳热。

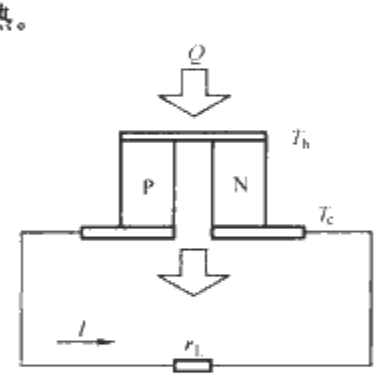


图 6.18-3 温差电单体对示意图

利用闭合电路的欧姆定律，即得

$$I = \frac{\varepsilon - v}{r_i} \tag{6.18-9}$$

式中：电动势 ε 由式（6.18-1）决定，而温差电单体对的内阻 r_i 在给定热、冷工作温度的工作状态下保持不变。所以表示这种温差电偶的伏安特性曲线的电流与电压 v 的关系是线性的（见图 6.18-4）。

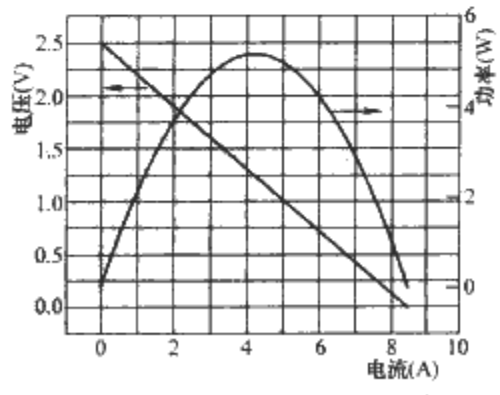


图 6.18-4 温差电偶的伏安特性

负荷上的电压为

$$v = Ir_L = \frac{\alpha_{PN}\Delta Tm}{1+m} \tag{6.18-10}$$

负荷上所获得的电功率为

$$p = I^2 r_L = \frac{\varepsilon^2 r_L}{(r_L + r_i)^2} = \frac{\varepsilon^2}{r_i} \cdot \frac{r_L/r_i}{(1+r_L/r_i)^2}$$

$$= \frac{\varepsilon^2}{r_i} \frac{m}{(1+m)^2} \tag{6.18-11}$$

式中：$m = r_L/r_i$。

设在系统中所产生的焦耳热 $I^2 r_i$ 中有一半传到热端，另一半则由冷端放出。热源所消耗的热量是珀尔帖热 P_h、由于热传递迁移到冷端的热 P_T 和交还给热源的焦耳热 $\frac{1}{2}I^2 r_i$ 三部分组成，即为 $P_h + P_T - \frac{1}{2}I^2 r_i$。温差电单体对的热电转换效率是有用功率与热源所消耗的热量之比。因此热电转换效率可写为

$$\eta = \frac{p}{P_h + P_T - \frac{1}{2}I^2 r_i} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \times$$

$$\frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{Kr_i}{\alpha_{PN}^2}\frac{m+1}{T_h} - \frac{1}{2}\frac{T_h - T_c}{T_h}\frac{1}{m+1}} \tag{6.18-12}$$

由（6.18-12）式可以看出，效率完全取决于：①热端与冷端温度；② $m = r_L/r_i$ 的选择；③ Kr_i/α_{PN}^2 主要由制造温差电单体的材料的性质来决定，我们将用 1/Z 来代替它，即

$$Z = \frac{\alpha_{PN}^2}{Kr_i} \tag{6.18-13}$$

将温差电元件的形状因子优化后，可以得到 Kr_i 的最小值。这时，

$$Z = \frac{\alpha_{PN}^2}{Kr_i} = \frac{\alpha_{PN}^2}{(\sqrt{k_P\rho_P} + \sqrt{k_N\rho_N})^2} \tag{6.18-14}$$

式（6.18-14）中：k_P、k_N 和 ρ_P、ρ_N 分别代表 P 型和 N 型温差电材料的热导率和电阻率。Z 的表达式只包含温差电单体对中两元件所用的材料的特性常数，而与它们的大小无关。我们把它叫作温差电单体对的优值。它的单位是 K^{-1}。

再经过数学运算，当

$$\left(\frac{r_L}{r_i}\right)\Big|_{opt} = M = \sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_h + T_c)} \tag{6.18-15}$$

时，获得热电转换效率的最大值，即

$$\eta_{opt} = \frac{T_h - T_c}{T_h}\frac{M-1}{M + T_c/T_h} \tag{6.18-16}$$

式（6.18-16）的第一个因子表示可逆热机的热力学工作效率，即卡诺效率。第二个因子表示由于热传导（k）和焦耳热（ρ）这两个不可逆过程而引起的工作效率的下降。k 和 ρ 在 Z 的表达式中最终影响 η。因此这部分实际上代表温差电材料的效率。

表 6.18-1 给出了温差发电有关的重要公式。

表 6.18-1　　温差发电有关公式

	P_{max}	η_{max}
I	$\frac{(\alpha_P - \alpha_N)\Delta T}{2R}$	$\frac{(\alpha_P - \alpha_N)\Delta T}{R(M+1)}$
R_L	R	MR
p	$\frac{[(\alpha_P - \alpha_N)\Delta T]^2}{4R}$	$\frac{M[(\alpha_P - \alpha_N)\Delta T]^2}{R(M+1)^2}$
η	$\frac{Z\Delta T}{4 + ZT_h + ZT_M}$	$\frac{(M-1)\Delta T}{(M+1)T_h - \Delta T}$

表中：$M = \sqrt{1+ZT_M}$，$T_M = \frac{1}{2}(T_h + T_c)$。

3　温差电材料

在温差电材料的研究中，定义了评价某一材料的热电性能的质量标准，即单一温差电材料的优值 Z（Figure Of Merit，有的地方称为品质因子），即

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \tag{6.18-17}$$

实际工作中，也经常使用它与热力学温度的乘积——无量纲优值 ZT 的概念。

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho k} = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T \tag{6.18-18}$$

从式（6.18-17）可以看出，要想得到优值高的材料，只有提高材料的塞贝克系数和电导率，降低材料的热导率。但是塞贝克系数、电导率和热导率都在不同程度上依赖于载流子浓度和迁移率。

3.1　重要的温差电材料

已经研究过的温差电材料，数量达 100 多种。图 6.18-5 所示为常用温差电材料的优值。

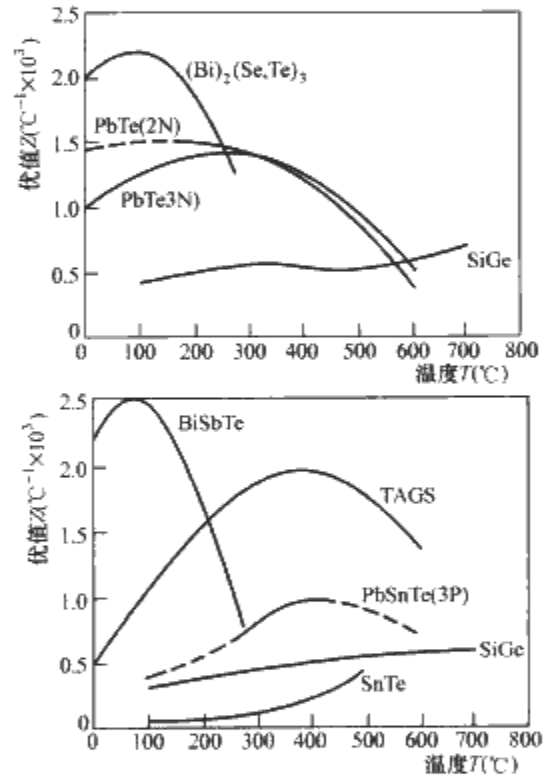


图 6.18-5　温差电材料的优值

3.1.1　碲化铋及其合金

低温温差发电器，应用最广的材料是Ⅴ-Ⅵ族化合物半导体碲化铋 Bi_2Te_3 及其固溶体。

碲的原子序数为 52，铋的原子序数为 83，在化学稳定性较好的化合物中，Bi_2Te_3 是分子量最大的二元化合物。Bi_2Te_3 的熔点是 585℃，密度为 7.819g/cm³。Bi_2Te_3 的晶体结构属三方晶系（菱形晶系），$R\bar{3}m$ 空间群，如图 6.18-6 所示。沿 C 轴方向可视为六面体层状结构，在同一层上具有相同种类的原子，层与层之间呈

$$-Te^{(1)}-Bi-Te^{(2)}-Bi-Te^{(1)}-$$

的原子排布方式。其中，$Bi-Te^{(1)}$ 之间以共价键和离子键相结合，$Bi-Te^{(2)}$ 之间为共价键，而相邻两个循环之间的 $Te^{(1)}$、$Te^{(1)}$ 原子之间结合能较弱，以范德华键相结合。因此，Bi_2Te_3 晶体很容易沿垂直于晶体 c 轴的面发生解理。

Bi_2Te_3 的化学计量比在晶体生长时不易控制。Bi_2Te_3 合金在熔点温度时化合物组分富 Bi，过剩的 Bi 在晶格中占

据 Te 原子的位置后形成材料的受主掺杂，因此，非掺杂材料 Bi_2Te_3 为 P 型。Bi_2Te_3 导电类型的控制方法，通常并不采用化学配比偏离的方法，而是通过掺杂的办法。掺杂量适当，使载流子在材料工作温度下具有最佳浓度。受主杂质为：Sn、Sb、Pb、As、多余 Bi。施主杂质为：Cu、Ag、Se、CuBr、SbI_3、AgI、多余 Te。

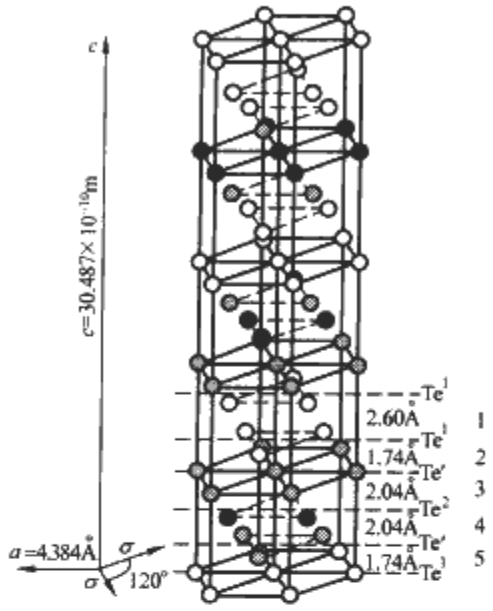


图 6.18-6 Bi_2Te_3 晶体的层状结构

1—范德瓦斯键；2—共价-离子键；3—共价键；4—共价键；5—共价-离子键

熔融生长的 Bi_2Te_3 及其合金的热电性质有强烈的各向异性。平行于解理面和垂直于解理面两个方向的热电性质差异很大

电导率比值 $\sigma_{//}/\sigma_{\perp}\approx 4\sim 10$

塞贝克系数比值 $\alpha_{//}/\alpha_{\perp}\approx 1$

热导率比值 $\kappa_{//}\ \kappa_{\perp}\approx 3\sim 5$

优值比值 $z_{//}/z_{\perp}\approx 2$

Sb_2Te_3、Bi_2Se_3 与 Bi_2Te_3 晶格结构相同，将一种或两种化合物加入 Bi_2Te_3 中，形成固溶体合金，在晶体结构中引入短程无序而不改变晶格的长程有序，在略降低迁移率的同时大大降低了材料的晶格热导率，从而提高了优值。

Bi_2Te_3 基赝二元体系主要有 Bi_2Te_3—Bi_2Se_3 和 Bi_2Te_3—Sb_2Te_3 两种，其具体组分还可以在很大范围内改变。组分为 $Bi_{2-x}Sb_xTe_3$ 的赝二元体系，最好的 P 型温差电材料，$x\approx 1.5$。组分为 $Bi_2Te_{3-y}Se_y$ 的赝二元体系，最好的 N 型温差电材料，$y\approx 0.3$。图 6.18-7 是赝二元体系合金与 Bi_2Te_3 的优值。

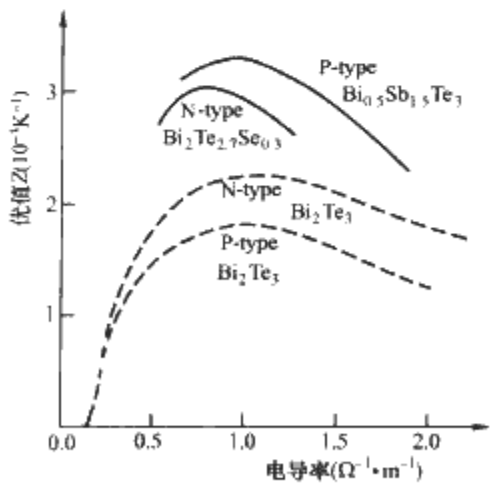


图 6.18-7 Bi_2Te_3 二元体系合金的优值

P 型和 N 型 Bi_2Te_3 的优值分别为 $1.8\times10^{-3}K^{-1}$ 和 $2.2\times10^{-3}K^{-1}$。P 型 $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ 的优值为 $3.3\times10^{-3}K^{-1}$，N 型 $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ 的优值为 $3.0\times10^{-3}K^{-1}$，单偶的优值为 $3.19\times10^{-3}K^{-1}$。目前，在冷凝方向，P 型和 N 型商用 Bi_2Te_3 基赝二元合金的性质十分接近。其室温热电性能如下

$\alpha=\pm 210\mu V/K$

$\rho=1.0\times10^{-5}\Omega\cdot m$

$\kappa=1.4W/(m\cdot K)$

$ZT=0.9$

Bi_2Te_3 基赝三元体系 Bi_2Te_3—Sb_2Te_3—Bi_2Se_3 中，优值最高的 P 型材料是掺杂过量 Te 的 $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_{2.91}Se_{0.09}$，而优值最高的 N 型材料是掺杂 SbI_3 的 $Bi_{1.8}Sb_{0.2}Te_{2.85}Se_{0.19}$，其室温优值分别为 $3.4\times10^{-3}K^{-1}$ 和 $3.2\times10^{-3}K^{-1}$。

3.1.2 碲化铅及其合金

碲化铅是一种具有面心立方晶体结构、共价的金属间化合物。纯碲化铅的熔点为 922℃，其禁带宽度比碲化铋大一倍，为 0.30eV。PbTe 只要暴露在空气中的时间长些，或者温度稍高，就会在表面生出黑色的氧化物。

在纯化学计量比的 PbTe 中假如有重量百分比 0.1 到 1.0 过量的铅或碲，就可使其抗张和抗压强度获得一些改进。PbTe 加静负荷若干时间就会显出塑性流动。PbTe 分子在 500℃以上加剧升华，而在 650℃以上就严重影响工作寿命。在这一过程中，PbTe 分子从热的元件表面蒸发，并从热区扩散，而沿温度梯度凝结在较冷的表面上。因此，PbTe 只适宜在不超过 500℃的中温工作。

在按化学配比的 PbTe 晶体中往往存在一定等量的 Pb 空格点和 Te 空格点。如果晶体制作过程中偏离化学计量比，若铅过量则得到 N 型 PbTe，若 Te 过量则可得到 P 型 PbTe。

PbTe 的掺杂，N 型一般是 Pb 过量，同时掺进一些卤族原子，常用的掺杂剂是 PbI_2 或 $PbBr_2$。P 型 PbTe 一般是 Te 过量，常用掺杂剂是 Na。

图 6.18-8 是不同掺杂的 PbTe 的电阻率。N 型掺 PbI_2，P 型掺 Na。

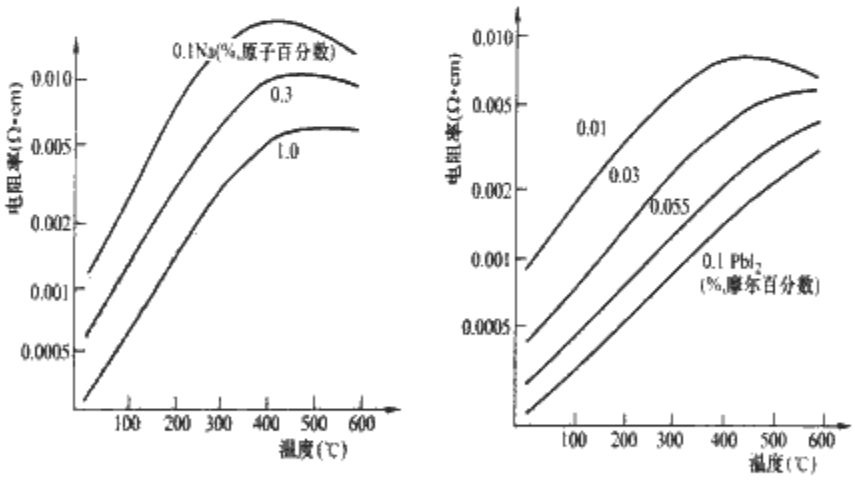


图 6.18-8 PbTe 的电阻率

图 6.18-9 为不同掺杂时 PbTe 的塞贝克系数随温度变化的曲线。图 6.18-10 和图 6.18-11 分别为不同掺杂时 PbTe 的热导率和优值随温度变化的曲线。

将 PbTe 中的组分按周期表的同族元素进行等原子替换，所得的合金固溶体可使其热导率大大降低，但因此也降低了其塞贝克系数和电导率，最终的优值略低于 PbTe，但它们的机械性能和稳定性却大为改善。这样的合金有 PbTe—SnTe、PbTe—MnTe—SnTe 等。

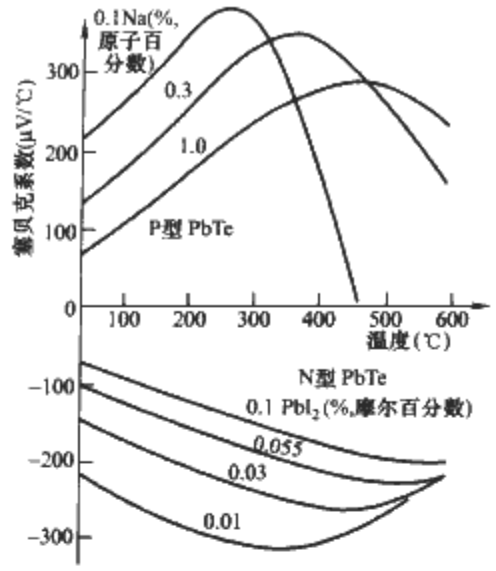


图 6.18-9　PbTe 的塞贝克系数

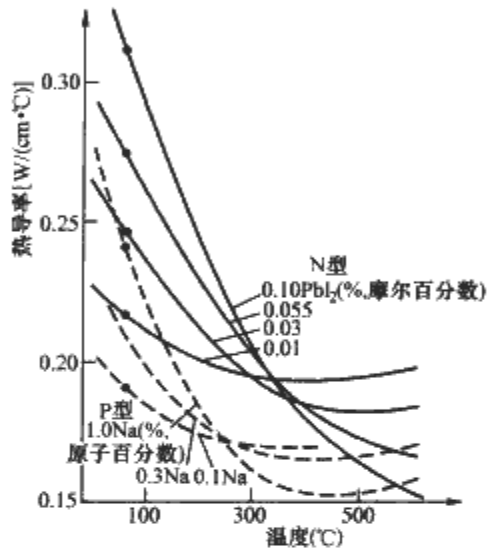


图 6.18-10　PbTe 的热导率

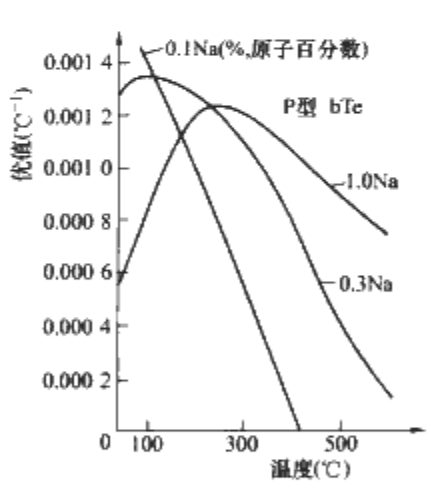


图 6.18-11　PbTe 的优值

3.1.3　硅锗合金

硅和锗按一定比例形成固溶体，是目前所知热电性能最佳的高温温差电材料。迄今为止，研究得较多的固溶体是 $Si_{0.70}Ge_{0.30}$、$Si_{0.80}Ge_{0.20}$ 和 $Si_{0.85}Ge_{0.15}$。

SiGe 合金中掺Ⅲ族元素形成 P 型半导体材料，掺Ⅴ族元素形成 N 型半导体材料。P 型掺杂剂一般为 B，它可使载流子浓度达到 $10^{26}/m^3$。N 型掺杂剂一般用 As 或 P。

从图 6.18-1 可看出，SiGe 合金的最大优值不高，但它在最大值区域变化平坦。由于相应最大优值是在高温，所以无量纲优值 ZT 值很大，接近于 1。此外，SiGe 合金的优点是密度小，只有 $3.5g/cm^3$；不论在真空或空气中都能工作；机械性能好，在很大的温度梯度（1900℃/cm）下能耐受温度循环无裂纹，并能长期工作，参数稳定。在 1100℃以上。材料的温差电参数开始变差，材料本身开始氧化，出现微小裂缝，并且成分也出现了各向异性。因此，SiGe 合金的使用上限为 1000～1100℃。

图 6.18-12 为 SiGe 合金温差电材料的热电性能。

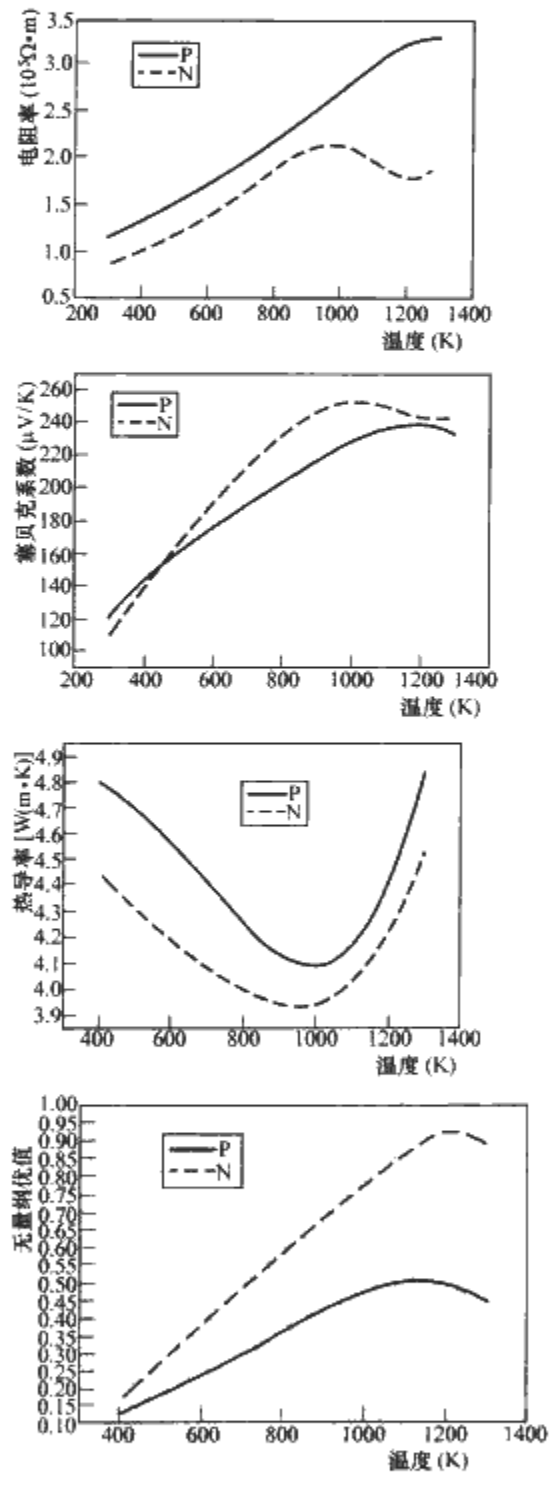


图 6.18-12　SiGe 合金的热电性能

3.1.4　TAGS

TAGS 由碲、锑、锗、银构成，是碲化银锑在碲化锗中的固溶体，其组分为 $(GeTe)_x(AgSbTe)_{1-x}$，是 P 型材料。TAGS 的晶格热导率很低，因此无量纲优值比 PbTe 高得多。TAGS 的机械性能优异，其抗压强度为 P 型 PbTe 的 2 倍，但其升华率比 PbTe 大 50 倍。TAGS 中含 80% 和

85%GeTe 时热电性能最好。其中 TAGS—80 的热电性能比 TAGS—85 好，但机械性能和稳定性不如 TAGS—85。TAGS 的最高使用温度为 510℃。

图 6.18-13 对若干种 P 型温差电材料的无量纲优值进行了比较。图 6.18-14 为 TAGS—85 的热电性能。

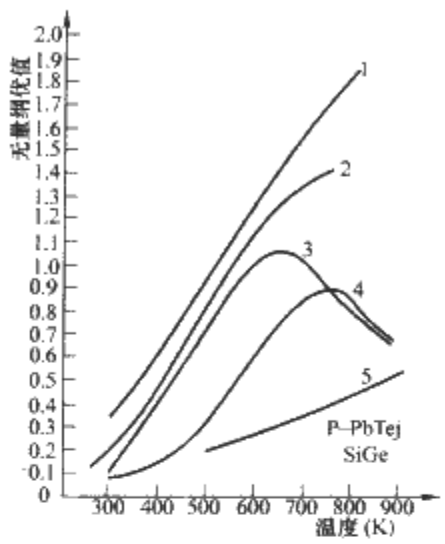


图 6.18-13 P 型温差电材料的无量纲优值

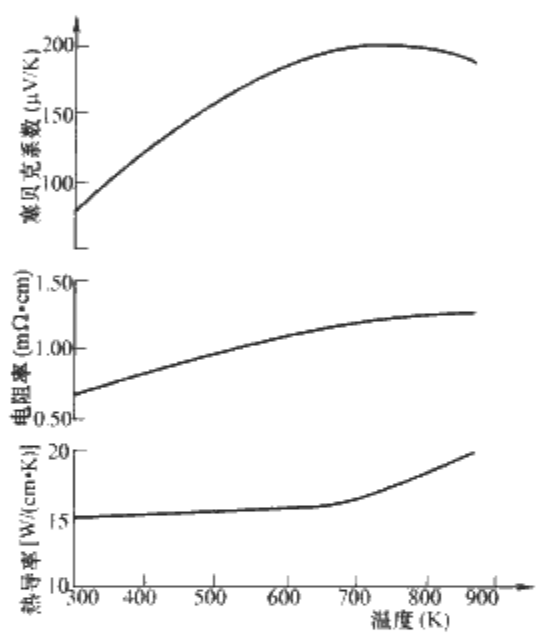


图 6.18-14 TAGS—85 的热电性能

3.1.5 填充方钴矿类温差电材料

近年来，公认的较有前途的中温温差电材料是一种方钴矿类材料（Skutterudites）。二元 Skutterudites 化合物是体心立方结构，空间群 Im^3，分子式可写为：MX_3。金属原子 M 可以是 Co、Ir 或 Rh；非金属元素 X 可以是 P、As 或 Sb。典型的化合物是 $CoSb_3$。二元 Skutterudites 化合物是窄能隙半导体，能隙仅为数百 meV。载流子迁移率高，塞贝克系数中等，但热导率比传统温差电材料要高。

填充 Skutterudites 化合物，由于将小原子插入了晶体结构的空隙，这些原子在平衡位置附近振动，有效地散射载热声子，因此大大降低了晶格热导率。填充 Ce、La、Th 入 $CoSb_3$，可以形成 P 型化合物 Skutterudites，700～1000K 时，其无量纲优值可达 1～1.4。

将大量 Ba（最大填充分数达到 0.44）填充入 $CoSb_3$ 中，得到 N 型样品。$Ba_{0.24}Co_4Sb_{12}$ 在 850K 时最高 ZT 达到 1.1。用 Ni 置换 Co 原子位置可以调制其热电性质。900K 时，$Ba_{0.3}Ni_{0.05}Co_{3.95}Sb_{12}$ 的无量纲优值 ZT 达到了 1.2。

图 6.18-15 为填充方钴矿温差电材料的无量纲优值。图中所示，除 $Ce_{0.9}Fe_3CoSb_{12}$ 外，其余都是 N 型材料。从图中可以看出，在 500K 到 800K 高温区，$Yb_{0.19}Co_4Sb_{12}$ 的 ZT 值显著高于 N 型 PbTe 材料。

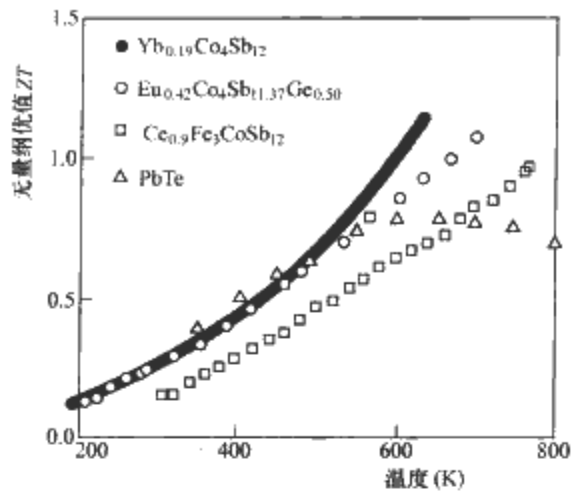


图 6.18-15 填充方钴矿温差电材料的无量纲优值

3.1.6 功能梯度温差电材料

由于构成温差电材料优值 Z 的 3 个参数塞贝克系数、电导率和热导率都是温度的函数。而同时，优值 Z 又敏感地依赖于材料种类、组分、掺杂水平和结构。一般而言，对某一种温差电材料来说，在杂质传导范围内，优值 Z 只在某一特定的温度才有峰值。

将功能梯度材料（FGM—Functionally Gradient Materials）的概念用在温差电材料上，构作功能梯度温差电材料，使每段温差电材料工作在其最佳温区，可使温差电材料在总体上达到较高的效率。

通常，在功能梯度温差电材料中，BiTe 用于低温范围，PbTe 用于中温范围，Si—Ge 用于高温范围，$LaTe_{14}$ 用于最高温范围。温度范围 300～1400K，FGM 温差电材料的 ZT 值近似为 1。经理论计算，热—电能量转换效率可达 23.3%，两倍于诸如 Si—Ge 等单一温差电材料，见图 6.18-16。

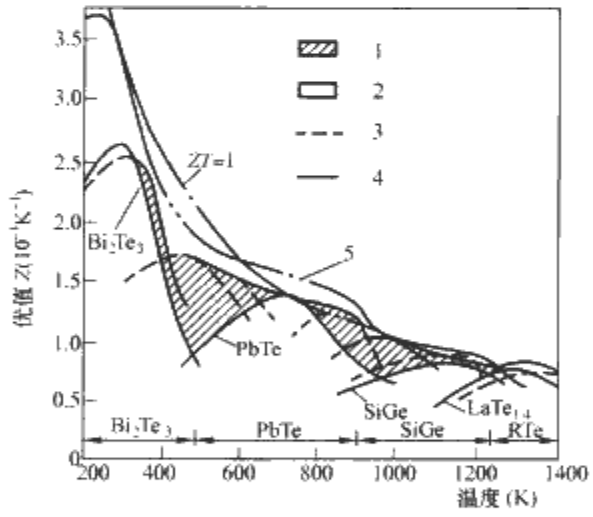


图 6.18-16 FGM 温差电材料 T—Z 曲线

1—载流子控制 FGM；2—织构控制 FGM；3—不同载流子浓度的材料；4—常规材料；5—FGM，Z 增加

图 6.18-17 是一种分段温差电单偶（Segmented Unicouple）的结构。P 型元件由 $CeFe_{3.5}Co_{0.5}Sb_{12}/Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$ 构成，N 型元件由 $CoSb_3/Bi_2Te_{2.95}Se_{0.05}$ 构成，经实验测定，其热电转换效率达到了 12%。

3.2 温差电材料制备工艺

温差电材料原则上可用通常的单晶体生长工艺来制备。从温差电材料的性能来看，这种工艺制得的材料电导率较高，但热导率也较高。因此，材料的优值不会有很大提高。而且单晶体工艺需要精密的设备，操作复杂，成本较高。在实践中温差电材料往往采用多晶或定向多晶材料。通常，制

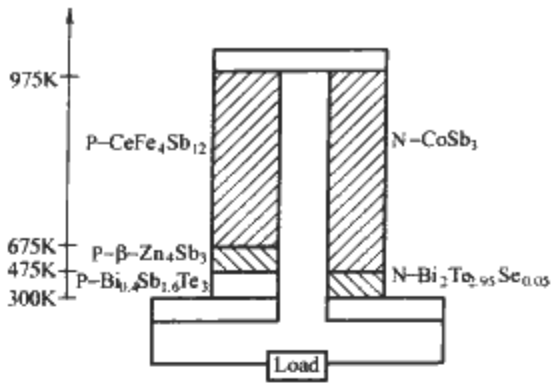


图 6.18-17　一种分段温差电单偶

备温差电材料的方法是粉末冶金法以及区域熔炼法。用粉末冶金法制备的温差电材料往往具有较低的热导率、较高的机械强度，但是却降低了电导率。相对而言，区域熔炼法可制备电导率较高的温差电材料，但同时也使材料的热导率提高了。粉末冶金工艺，常规的有冷压法和热压法，近年来又发展了机械合金法（MA）、粉碎混合烧结（PIES）法、挤压法和放电等离子烧结法（SPS 法）。通常，PbTe 及 SiGe 合金用粉末冶金工艺制备，Bi_2Te_3 及其合金用区域熔炼法、热压工艺或挤压工艺制备。

常规粉末冶金法的工艺流程如图 6.18-18 所示。

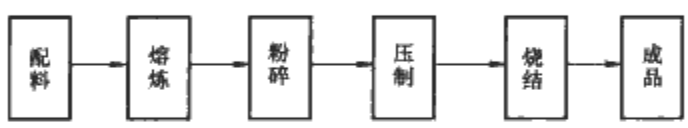


图 6.18-18　粉末冶金法的工艺流程

区域熔炼法的工艺流程如图 6.18-19 所示。

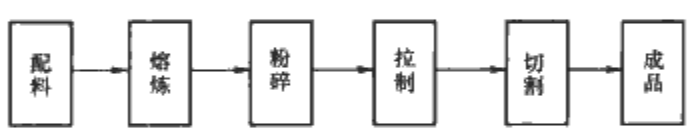


图 6.18-19　区域熔炼法的工艺流程

3.2.1　配料和熔炼

配料和熔炼是所有材料制备工艺中的共有的工艺步骤。

（1）配料。各组分极少量的偏离会对温差电材料的热电性能产生极大的影响。因此，配料前精确计算各组分的重量、配料时精密称量是非常重要的。称量必须在精确度较高的分析天平上操作。

（2）熔炼。熔炼的目的在于使各组分元素在高温时充分化合，没有组分的偏析或游离。

由于很多温差电材料的蒸气压很高，某些元素很易氧化，在熔炼时某些元素特别容易从熔炼表面逸出，以致使材料偏离配方中的比例。因此，在熔炼过程中容器必须严格密封，或者将容器抽真空后充一定压力的惰性气体，以抑制组分的逸出。也可采用能产生还原性气体的碳粉来保护。

熔炼的方法一般可采用高频感应熔炼、电阻炉熔炼等。高频熔炼有电磁搅拌作用，升温降温都很快，溶液均匀。采用其他方式熔炼时，可设法摇动或搅拌熔液，使合金均匀化合。

熔炼的工艺要素是熔炼温度、保温时间和冷却方式。选择的熔炼温度可比化合物的熔点高 30～50℃。保温时间一般为 30～190min。最后要让溶液迅速冷却。

3.2.2　粉末冶金法

（1）粉碎。粉末粒度大小对压制成型后的温差电材料的热电性能有一定的影响。如粒度太小，则粉末粒子互相间的接触面积十分大，将增加材料的热导率；反之，如粒度太大，则将减少材料的电导率。同时，粒度不均匀时，也会造成材料内部热电性质不均匀和机械性能的不均匀性。

温差电材料的粉碎一般采用机械粉碎法，经常采用的是捣磨法或球磨法。

（2）压制成型。成型的目的是使材料成为具有一定形状、尺寸和密度的型坯。加压使粉末成型，通过压力有可能使粒子内的很多原子在原子引力所能及的范围内互相接触，从而使粒子间产生粘附力；另外，根据粒子的形状，在加压中也有因滑动、转动等原因，其粒子之间机械的相互咬合在一起而产生维持其形状的力。也有时由于粒子表面相互摩擦，将粒子表面上的氧化膜或杂质膜破坏，而出现清洁的粒子表面，使之容易粘附。为了得到好的温差电元件，在压制成型过程中必须使密度均匀分布。

压制成型过程中所加压力的大小，依粉末种类、形状及各种条件而有很大差异。压力过大，材料上易产生裂纹、伤痕和缺陷；压力过小则使材料过于疏松，存在气泡和缺陷。

制造温差电元件时常用的粉末压制成型方法有：①封闭的刚性模具冷压法；②热压法；③挤压法；④静水压法等。

封闭的刚性模具冷压法：封闭的刚性模具冷压法也就是常称的冷压法。其方法是将粉末放入刚性模具中，通过模冲对粉末加压，使其成型。

热压法：熔炼后的温差电材料粉末在高温下较柔软，因此热压比冷压可获得较致密和机械强度好的材料。如适当选择压力与温度，热压方法可以同时进行成形与烧结两道工序。

温差电材料的热压可采用石墨模具。石墨能耐热，能产生还原性气体，但机械强度差。某些高温合金钢制的模具可用作 800℃热压模具的材料，并能反复使用。

通常，热压必须在还原或惰性气氛中进行。一般多用 H_2 作还原气氛。由于高温时被压制材料严重地氧化，所以用石墨模具时，产生的 CO 也起着还原作用。

（3）烧结。对粉末压制的温差电元件进行烧结的目的是：

1）使温差电材料的晶粒细化，提高强度、韧性和塑性。

2）消除应力。

3）消除或减少材料组分和结构的不均匀性。

4）改善材料的温差电性能。

3.2.3　区域熔炼工艺

使用区域熔炼法（简称区熔法）可以制备 Bi_2Te_3 及其合金的定向多晶材料，由于其晶粒有明显的取向性，通常获得的材料的优值比粉末冶金法高。

区熔法生长晶体，是借助于高频感应线圈加热或普通电阻加热，使材料在一个狭窄的区域内熔化，然后令熔区自下而上（或自左而右）地通过竖直（或水平）放置的粗材料进行提纯和结晶。该过程可以在真空内进行，也可以在一定还原气氛下进行。图 6.18-20 是区域熔炼法示意图。

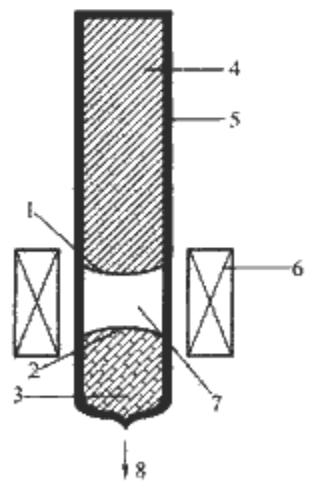


图 6.18-20　区域熔炼法示意图

1—熔融界面；2—固化界面；3—生长的晶体；4—粗晶锭；5—安瓿；6—炉子；7—熔区；8—安瓿移动方向

为了获得定向较好的多晶体，在区熔过程中，首先要求高温区的温度应高于晶体的熔点，使待区

熔晶棒得以充分熔解，但必须避免熔体组分的大量挥发；而低温区的温度应低于晶体的熔点，但不能太低，避免晶体炸裂或产生大的内应力。其次在熔体生长过程中，应尽量避免或减少组分过冷现象发生。理论分析表明，发生组分过冷的临界条件为

$$\frac{G}{V} \leqslant \frac{mC_0(k_0-1)}{Dk_0}$$

式中：G 为熔体界面处的温度梯度；V 为熔区移动速率；C_0 为熔体中主要杂质平均浓度；m 为液相线斜率；k_0 为杂质的分凝系数；D 为杂质在熔体中的扩散系数。公式中，G 和 V 是可以调节的工艺参量，m、c_0、k_0 和 D 是晶体生长系统的物理参量。从上式可以看出，假如生长速率 V 大，温度梯度 G 小和平衡分凝系数 k_0 小，均易发生组分过冷。实践表明，在保证晶体不发生解理的前提下，采用适当大的温度梯度、相对小的生长速度，对避免或延迟组分过冷的出现是有利的。

3.2.4 SPS 方法

脉冲电流烧结（Pulse Electric Current Sintering，PECS）是一种新型快速烧结技术，它包括等离子活化烧结（Plasma Activated Sintering，PAS）系统和放电等离子烧结（Spark Plasma Sintering，SPS）。其显著特点是可以快速低温制备材料。

图 6.18-21 是采用脉冲电流烧结的一种 SPS 装置示意图。该装置由脉冲电流和直流发生器、真空系统、压力系统、冷却系统和自动记录等部分构成。

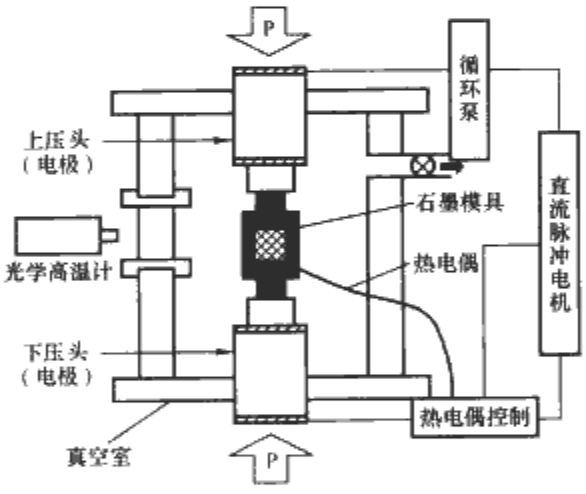


图 6.18-21 SPS 烧结系统原理图

将填装了粉料的石墨模具放置炉中，先施加一定的压力（亦可自动控制加压），然后在上下冲头之间通以脉冲电流（一般为 120s），再通以直流电流进行电阻加热（该电流中包含有小的脉冲电流成分），通过调节直流电的大小可以控制升温速率。整个烧结过程既可在真空环境下进行，也可在惰性气氛中进行。试验中根据材料的特性，选择压力、脉冲电流及直流电的大小来实现材料的致密化。

SPS 烧结装置类似于传统的热压烧结，但有其明显不同的特征。首先，SPS 采用脉冲电流烧结（低压大电流）作为动力源，而热压烧结一般采用交流电源；其次，SPS 烧结中，发热体提供的热能通过气氛（N_2 和 Ar）传给模具，再由模具传给烧结的材料。此外，SPS 烧结一般不受材料本身特性及所制备样品尺寸的限制。

4 温差电换能器的设计

4.1 一般考虑

从热机的观点来看，温差发电器可分为三部分：一是热源；二是换能器；三是散热器。温差电换能器是温差发电器的核心部分。

温差电换能器的电设计计算通常有下面三种类型：

（1）已知需要的电功率和负载电压，设计出一个在最佳效率工作的温差电换能器。

（2）已知热源的功率，温差电材料及其允许使用的最高温度，设计出一个在一定负荷电压下工作、功率最大的温差电换能器。

（3）已经有一个温差电换能器，根据其热端工作温度和冷端工作温度，确定这个换能器的性能参数。

第一种类型首先遇到怎样选择温差电材料的问题。一般我们可以根据附加的条件，如热源能达到的温度、发电器工作的环境条件，以及对发电器工作寿命的要求，从现有温差电材料中选择一种合适的材料。

其次，要确定温差电元件可在怎样的热端工作温度下工作。对于确定组分的温差电材料来说，热端工作温度是有一定限制的。在这个限度之内，热端工作温度愈高，换能器寿命愈短。反之，热端工作温度愈低，则换能器寿命愈长。

冷端工作温度可以根据环境条件和外壳的散热情况来定。若想有较低的冷端工作温度，则要求大的散热器，但比功率也减小了。反之，若要提高比功率，则要设计较小的散热器，于是冷端工作温度不得不相应提高。

一般来说，对于地面用温差发电器，冷端温度可以设计到 100℃左右。因为对地面用温差发电器来说，比功率并不重要，而可以设计较笨重的散热器。

在设计换能器时，一般可将所有单体串联起来，这时每对单体产生的温差电动势的总和就是换能器总的温差电动势。为了提高换能器的可靠性，可采用串－并联或并－串联结构，将单体按各种方式连接起来。

4.2 温差电换能器参数设计

4.2.1 基本假设

为了使问题简化，我们先作如下的假设：

（1）温差电元件工作在 T_h 和 T_c 之间。

（2）温差电换能器内的热绝缘是完美的，即漏热可忽略不计。

（3）温差电元件与电极之间的接触电阻，各单体对间的引线电阻可忽略不计。

4.2.2 计算单体对的优值和电动势

如果我们已预先测得温差电材料的 α、ρ、κ 随温度变化的曲线，就可以求得材料在 T_h 和 T_c 之间的 α、ρ、κ 平均值 $\bar{\alpha}_P$、$\bar{\alpha}_N$、$\bar{\rho}_P$、$\bar{\rho}_N$、$\bar{\kappa}_P$、$\bar{\kappa}_N$。由此可计算单体对的优值 $\bar{Z}$，即

$$\bar{Z} = \left(\frac{\bar{\alpha}_P + \bar{\alpha}_N}{\sqrt{\bar{\rho}_P\bar{\kappa}_P} + \sqrt{\bar{\rho}_N\bar{\kappa}_N}}\right)^2$$

每对单体对产生的电动势为

$$\varepsilon = (\bar{\alpha}_P + \bar{\alpha}_N)(T_h - T_c)$$

4.2.3 计算单体对数及其几何尺寸

以下的计算可根据两种不同的要求进行，第一种，要求获得最高效率；另一种，要求获得最大输出功率。

（1）使换能器达到最高效率。

由第二节可知，当 $M = \sqrt{1 + Z(T_h + T_c)/2}$ 时可获得最高效率，表达式为

$$\eta_{max} = \frac{T_h - T_c}{T_h}\frac{M-1}{M + T_c/T_h}$$

一对单体提供给负荷的电压为

$$\upsilon = \frac{\varepsilon}{1+1/M} = \frac{M\varepsilon}{1+M}$$

如果换能器输出功率为 P，输出电压为 V，则单体对数和几何尺寸可用下述方法计算。

单体对数　$N = \dfrac{V}{\upsilon}$

每对单体提供的功率为　$P = \dfrac{P}{N}$

每对单体的负荷电阻为　$r_L = \dfrac{\upsilon^2}{P}$

每对单体的内阻为　$r_i = \dfrac{r_L}{M}$

可得方程组
$$\begin{cases} \dfrac{D_N}{D_P} = \sqrt{\dfrac{\kappa_N \rho_P}{\kappa_P \rho_N}} \\ \rho_P D_P + \rho_N D_N = r_i \end{cases}$$

求解方程组可得 P 型、N 型单体的形状因子 D_P 和 D_N。因为 $D_P = L_P/A_P$，$D_N = L_N/A_N$。对于圆柱形单体而言有，

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

所以

$$\begin{cases} D_P = \dfrac{4L_P}{\pi d_P^2} \\ D_N = \dfrac{4L_N}{\pi d_N^2} \end{cases}$$

由此即可计算温差电单体的几何尺寸。其确定方法分两种情况：其一，先确定长度，再求最佳直径；其二，先确定直径，再求最佳长度。

(2) 使换能器输出功率最大。

当 $M=1$ 时，可得最大输出功率，此时效率为

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{2T_h + \dfrac{4}{Z} - \dfrac{1}{2}(T_h - T_c)}$$

在进行换能器实际计算时，必须考虑到单体的接触电阻和连接条电阻等附加电阻，以及换能器内通过绝热材料的漏热等因素引起的修正。

5　温差发电器的结构

一个有使用价值的温差电换能器是由几对甚至几十对以上的温差电单体串联或并联组成。在整个换能器中要使单体、热源、外壳三者间相互电绝缘，并且在由热源、温差电元件及附件—散热器组成的热路上有最小的热阻。

通常，温差电换能器采用两种结构。一种是以热源为中心，温差电元件辐射状排列的结构；另一种是将温差电元件紧压在热源一侧的平板结构。前者采用一定结构的冷端构件以后，具有极高的抗冲击振动能力，转换效率较高，但成本也较高。后者安装方便，成本较低，但热量利用率较低。

在这两种结构换能器中温差电单体都可采用分立元件或组合件的形式。所谓组合件就是将若干温差电单体对紧凑地排列成一个阵列，温差电元件之间电绝缘，并按一定工艺和方式焊上电极，成为一个整体。采用这种组合件后换能器结构紧凑，装配容易，也提高了单体抗冲击振动的能力和转换效率。但要保证每对单体都有较小的接触电阻，工艺上较困难。

5.1　温差发电组件

低温温差电换能器，一般采用 Bi_2Te_3 基温差电材料。换能器的结构类似于常规的单级温差电致冷组件，由若干对温差电偶电串联构成，温差电元件呈矩形截面。流行的结构中铜制导流片连接 P、N 型元件，用高纯氧化铝 Al_2O_3（或氧化铍 BeO、氮化铝 AlN）陶瓷片在冷面和热面与外界耦合。这种夹层结构示于图 6.18-22 中。

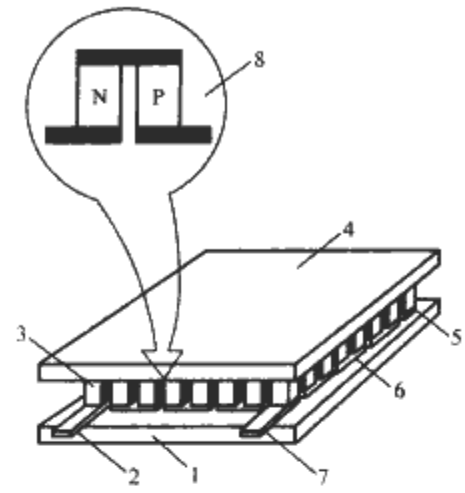


图 6.18-22　温差发电组件的结构

1—冷面陶瓷片；2—输出端（+）；3—N 型元件；4—热面陶瓷片；5—温差电元件；6—电极；7—输出端（—）；8—温差电单体

微型温差电换能器，往往采用粉末冶金法制作的块状 Bi_2Te_3 基温差电材料。一种制作过程如下：先将 P、N 型温差电材料切成薄片状，用聚酰亚胺按 PNPN 交替粘结在一起，在垂直于片厚度的方向切成薄片，用聚酰亚胺按 PNPN 交替粘结在一起，在元件长度方向磨平，在两磨平的端面用掩模法蒸镀金电极，将温差电元件串联起来。为提高可靠性，也可采用并串联连接方式。用这种方法制作的微型温差电换能器含有几百对细而长的元件。例如，一种峰值电功率 40mW 的电池，元件尺寸 0.381mm×0.381mm×22.86mm，元件排列为 18×18，组件重量 7g，匹配负荷 5V。

5.2　中温温差发电器

中温温差发电器，使用最多的是 PbTe 基温差电材料，其结构以 Snap3B 和 Snap—19 为代表。这是一种以热源为中心，温差电元件辐射状排列的典型结构。

Snap3B RTG，用于子午仪（Transit）导航卫星，是世界上第一个空间应用的同位素温差发电器。其输出电功率 2.7W，重量 2.1kg。内部有 27 对串联的 PbTe 2N/2P 元件，N 型材料掺杂 PbI_2，P 型材料掺杂 Na。加弹簧负载。热面温度 783K，冷面温度 366K。热电转换效率在 5%～6%。内部填充 Min—K1301 绝热材料。Transit 4A 的 Snap—3B7 发电器内部是真空状态，以减少传导损失。而 Transit 4B 的 Snap—3B8 发电器内部充混合惰性气体（氪—氢）以抑制温差电材料升华，同时减少氧气在发射前漏入发电器内部。TransitA 工作寿命超过 19 年，TransitB 超过 10 年。图 6.18-23 为 Snap3B RTG 结构示意图。

Snap—19 发电器的结构是为了满足输出电功率 40～50W 的任务要求而设计研制的。该发电器结构的基本形式类似于 Snap3B，即是以热源为中心，温差电元件辐射状排列的结构。

最早的 Snap—19 RTG 设计用于雨云（Nimbus）气象卫星。温差电元件是冷压、烧结的 PbTe。90 对 PbTe 3P/2N 单体，发电器一共有 6 个组件，一个组件内有 19 对单体，每 5 对单体串联后分 3 组并联之。发电器的 6 个组件串联起来，装入镁钍合金外壳。单体用冶金焊接法与铁靴焊接，用弹簧—活塞—调整扣组成冷端组合体，温差电单体上加压力负荷 89N。绝热材料用 Min—K1301。初期充压力

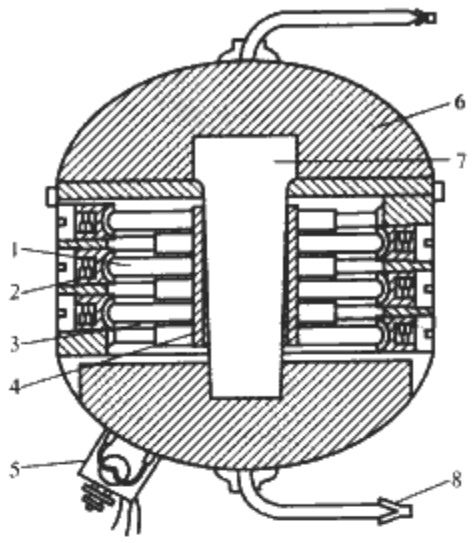


图 6.18-23 Snap3B RTG 结构示意图

1—温差电元件；2—冷结；3—云母片；4—热结；5—电输出接插件；6—绝热材料（Min—K 1301）；7—燃料盒，Pu—238；8—抽气管

110kPa 氩气，以减小 PbTe 材料的升华（热面温度 800K），避免发射前氧气扩散进入发电器。

Snap—19 温差电单体结构见图 6.18-24。图 6.18-25 为 Snap—19 温差电组件结构。图 6.18-26 为海盗号火星着陆器用 Snap—19 放射性同位素温差发电器的结构。Snap—19 的结构进行了几次改进，成功地应用在美国雨云气象卫星、先驱者飞船和海盗号火星着陆器上。阿波罗工程使用的 Snap27 RTG 换能器的结构也与 Snap—19 大同小异。

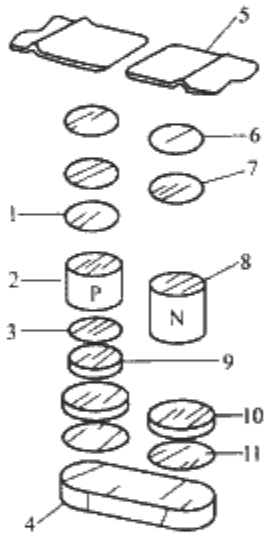


图 6.18-24 Snap—19 温差电单体结构

1—连接片；2—TAGS—85；3—连接片；4—热靴；5—电互连条；6—焊料片；7—冷帽；8—2N—PbTe；9—SnTe 段；10—帽；11—硬焊片

Pioneer（先驱者）/Snap—19 在 Nimbus/Snap—19 基础上进行了改进。改进要点如下：

采用 TAGS—SnTe/2N 温差电单体，提高了效率，改善了电源的长期性能。发电器中 P 型温差电元件使用的是 TAGS—85，其热面接入一小段 SnTe，降低了 TAGS 热面工作温度。N 型臂则采用 3M—TEGS—2N（M）Pb—Te。

改进了电路设计将发电器的磁场减小到较低的级别。发电器内部充 75∶25 氦—氩混合气，加入氧化锆吸气剂避免氧气危害。除电引线接插件用 O 形环密封外，其他所有漏气通道都用焊接密封。

Viking（海盗）/Snap—19 为了适应火星任务的需要，又作了大量改进。改进型后的 Snap—19，加上半球形存贮器。发电器内部初期充气比例，氦∶氩为 90∶10；而存贮器内充气比例，氦∶氩为 5∶95。每个海盗号火星着陆器带 2 个串联的 Snap—19 同位素发电器，为科学仪器供电，并

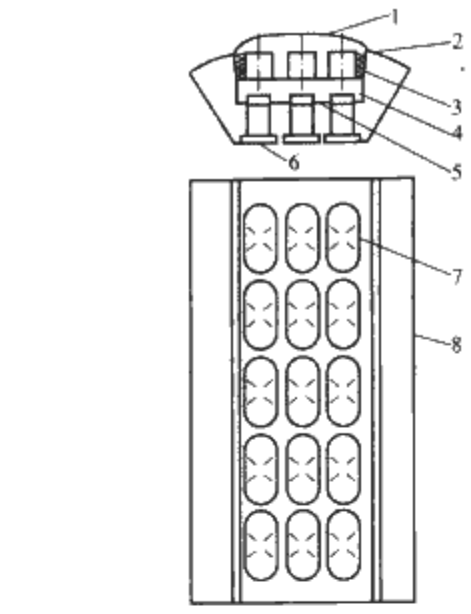


图 6.18-25 Snap—19 温差电组件结构

1—热槽板；2—弹簧；3—活塞；4—调整扣；5—互联条；6—热电极；7—温差电单偶；8—绝热材料

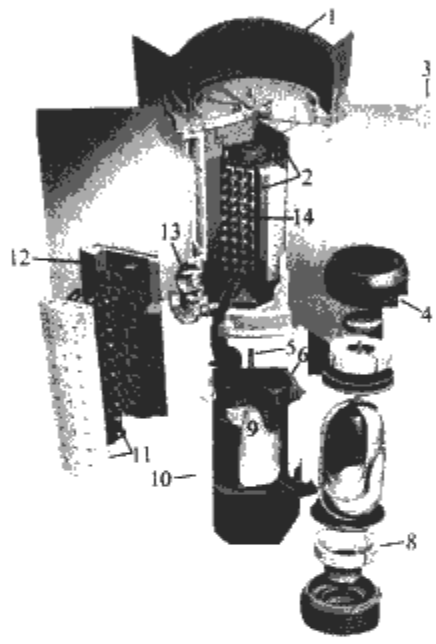


图 6.18-26 海盗号火星着陆器用 Snap—19 RTG

1—氦气存储器；2—绝热材料；3—散热片（6）；4—热屏蔽塞（2）；5—热源盒放气管；6—吸气剂；7—放射性同位素燃料；8—热源盒支撑环（2）；9—同位素热源盒；10—热屏蔽；11—温差电组件冷槽组合体（6）；12—温差电组件绝热材料；13—RTG 电输出接插件；14—温差电单体（90）

给 4 组镍镉电池充电。同位素发电器同时给着陆器提供热能，使电子部件维持在特定工作温度。

5.3 高温温差发电器

目前，已经成功地在空间应用的高温温差发电器，都使用锗－硅合金温差电材料，例如林肯通信卫星（MHW—RTG）、旅游者飞船（MHW—RTG）、卡西尼飞船（GPHS—RTG）等。这些放射性同位素温差发电器也采用以热源为中心，温差电元件辐射状排列的换能器结构。

SiGe 温差电单体的结构和安装方式与 PbTe 中温发电器有很大差别。

所谓可卸式 SiGe 温差电单体结构，如图 6.18-27 所示。SiGe 温差电单体热端用大面积集热板（热电极）相连。冷端焊上冷电极后连接到带阴螺纹的螺栓上。发电器装配时，将螺栓（已焊上 SiGe 温差电偶）插入 RTG 外壳带锥度的孔中，再用螺母将它拧紧在外壳上。最后温差电单体以悬臂方

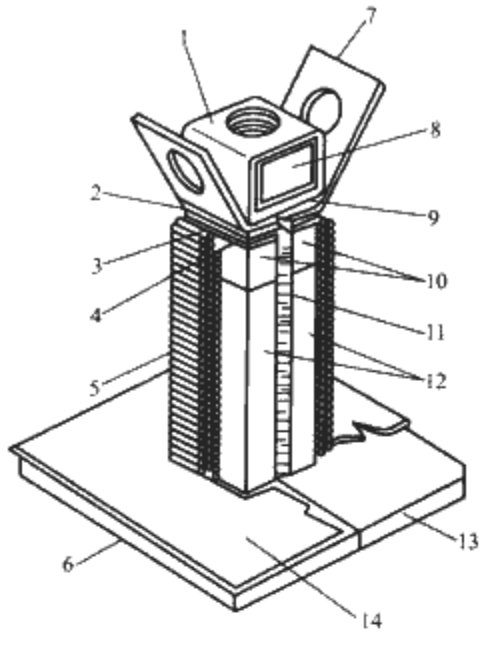


图 6.18-27　SiGe 温差电单体的结构

1—铜分流器；2—钨补偿体；3—铜垫块；4—冷电极；5—石英纤维线；6—P 型热电极；7—电互连条；8—螺母；9—电绝缘体；10—SiGe 冷端材料；11—石英棉；12—SiGe 元件；13—N 型热电极；14—电绝缘体

式支撑在外壳上。因此这种结构不需要弹簧压紧式系统。这种结构较灵活，能拆卸。螺母上施加的力矩应使螺栓略为变形，使螺栓和 RTG 外壳能紧密相配合，达到机械上牢固、热流畅通的目的。热电极材料通常使用含 95%Si 的 SiMo 合金。冷电极材料一般使用钨。SiGe 温差电偶和 SiMo 热电极上有 Si_3N_4 涂层以减小 SiGe 升华。温差电偶外面再绕上若干层 SiO_2 纤维作电绝缘物。发电器内采用钼箔和加钼遮光石英纸交叠组成的多层箔绝热材料。

百瓦级同位素温差发电器（MHW—RTG）含有 312 对单体，分成 24 条安装，每条有 13 对单体。每个单体分别用螺栓固定在外壳上。设计热结温度 1273K（热靴温度 1308K），冷结温度 573K。输出电功率约为 190W。通用热源同位素温差发电器（GHPS—RTG）由 572 对与 MHW—RTG 相同的单体通过串并联构成，输出电功率约为 300W。图 6.18-28 为 GHPS—RTG 的结构。

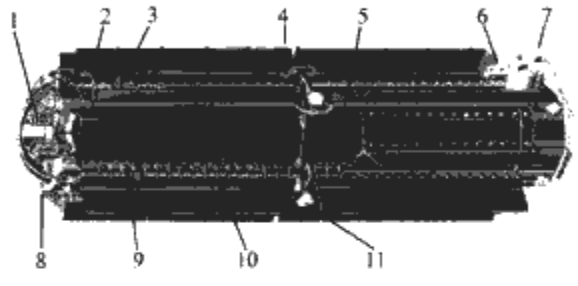


图 6.18-28　GPHS—RTG 的结构

1—热源支撑件；2—冷却管；3—气体控制构件；4—铝外壳构件；5—通用热源（GPHS）；6—主动冷却系统集管；7—压力释放器件；8—RTG 安装法兰；9—多层箔绝热材料；10—硅—锗单体；11—热源盒中部支撑件